



João Pedro Matos Coelho

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

**Avaliação da injeção de *grouts* em
alvenarias antigas com ensaios
não destrutivos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques,
Professor Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão
Arguente: Profª Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues
Vogal: Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2013

‘Copyright’ João Pedro Matos Coelho, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Fernando Henriques pela oportunidade concedida para a realização da presente dissertação, pela disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas durante a elaboração da mesma e pela referência de conhecimento e competência que constituiu durante todo o percurso curricular do mestrado.

Gostaria igualmente de agradecer ao Engenheiro Fernando Jorne por toda a disponibilidade para esclarecimentos e partilha de informações durante a realização da presente dissertação.

Quero também agradecer a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela valiosa contribuição para a minha formação académica através de aulas, esclarecimentos e nível de exigência com que sempre pautaram as suas avaliações.

Gostaria também de agradecer a todos os colegas de mestrado com os quais tive o prazer de conviver, estudar, aprender e evoluir a nível pessoal e intelectual.

Por fim, agradeço especialmente à minha família pelo apoio incondicional prestado, a todos os níveis, durante todo o percurso curricular do mestrado, sem o qual teria sido impossível completar a presente etapa da minha formação académica.

Preâmbulo

A presente dissertação foi elaborada no âmbito do projecto de investigação *Optimização de caldas para consolidação de alvenarias* (PTDC/ECM/104376/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Educação e Ciência, integrando-se no trabalho desenvolvido pela equipa de investigação coordenada pelo orientador desta dissertação, à qual o autor se juntou no período em que a esteve a preparar. Por essa razão a dissertação usa metodologias e conhecimentos desenvolvidos anteriormente no desenrolar do projecto e que em alguns casos não foram ainda publicados ou aguardam aceitação nas revistas a que foram submetidos.

Os diferentes horizontes temporais em que se desenvolvem as várias acções que integram o projecto, designadamente as teses de doutoramento em curso, as dissertações de mestrado já terminadas e a conclusão do próprio projecto, levam a que esta situação de utilização de conhecimentos, metodologias e informação ainda não publicados não seja condicionada, sob pena de inviabilizar a conclusão dos trabalhos cujo âmbito ou duração sejam mais reduzidos. Daí decorre que muita informação não publicada utilizada nesta dissertação seja propriedade intelectual de membros individuais da equipa ou da equipa de investigação em geral. Para clarificação do assunto e para além desta nota, foi utilizada a figura da comunicação particular para referenciar alguma dessa informação, sem prejuízo de existirem situações que possam não estar totalmente identificadas.

Resumo

Com o envelhecimento do património edificado, é crescente a necessidade de intervenção no sentido de otimizar as respectivas condições de habitabilidade, segurança e conforto. Neste contexto, as alvenarias históricas constituem-se como elementos merecedores de atenção redobrada e prioritária.

O presente trabalho incide sobre a avaliação de um tipo específico, e frequentemente utilizado, de acções para a reabilitação e conservação de alvenarias históricas. No sentido de melhorar o comportamento estrutural desse tipo de alvenarias são efectuadas acções de consolidação. Uma das técnicas mais utilizadas de consolidação é a injeção de *grouts* nas alvenarias, que se tem vindo a verificar como sendo bastante adequada para o restabelecimento da homogeneidade, continuidade e uniformidade de tensões entre diferentes panos de alvenaria antiga. Os objectivos da utilização desta técnica passam não apenas pelo preenchimento dos vazios existentes no sentido de aumentar a compacidade e, consequentemente, a resistência mecânica do meio injectado, como também pela criação de ligações entre os diferentes panos de alvenaria, vital em casos de deficientes ligações transversais. Desta forma, a necessidade de avaliação da eficiência da injeção de *grouts* em diferentes meios porosos conduziu à criação de modelos que simulassem, com a maior fiabilidade possível, alvenarias antigas (meios porosos) com diferentes composições.

O presente trabalho dá seguimento à injeção de *grout* em diversos meios porosos e incide fundamentalmente na realização de ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica, no sentido de avaliar a qualidade das injeções e o seu efeito na compacidade dos diferentes meios porosos estudados. Posteriormente, foram também realizados ensaios de resistência à tracção por compressão diametral (também designados por *Splitting Tensile Strength Test*) das amostras, de forma a conhecer as resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeção dos diferentes meios porosos.

A utilização combinada das técnicas de ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons e de tomografia ultra-sónica constitui-se como uma ferramenta de grande utilidade na aferição da morfologia estrutural interna dos modelos criados, permitindo a obtenção de informações quantitativas e qualitativas sobre os meios porosos em estudo. Importa também notar que, numa injeção de *grout*, a probabilidade da existência de falta de monolitismo estrutural de uma parede é substancialmente reduzida aquando de um bom preenchimento e ligação do *grout* com os materiais constituintes da parede. O risco de colapso frágil, que se caracteriza pelo destacamento dos panos exteriores de alvenaria, é assim reduzido.

Termos chave: ultra-sons, tomografia ultra-sónica, injeção de *grout*, meio poroso, ensaios mecânicos

Abstract

With the aging of the built heritage, there is an increase in the need for intervention in order to optimize the conditions of habitability, safety and comfort. In this context, the historic masonries are elements deserving of increased attention and priority.

This work focuses on the evaluation of a specific and frequently used type of actions for the rehabilitation and conservation of historic masonry. In order to improve the structural behavior of such walls, methods for consolidation are used. One of the most used techniques for consolidation is the injection of grouts in masonry, which has been observed to be quite suitable for the restoration of homogeneity, continuity and uniformity of stress between different leaves of old masonry. The goals of this technique include not only filling the existent voids in order to increase the compactness and therefore the mechanical strength of the medium, but also creating bonds between different masonry leaves, which is fundamental in cases where the bonds are deficient. Thus, the necessity of evaluating the efficiency of grout injection in different porous media has led to the creation of models that simulate, as reliably as possible, old masonries (porous media) with different compositions.

This work follows the injection of grout in various porous media and focuses primarily on ultrasonic testing and ultrasonic tomography, to assess the quality of the injections and their effect on the compactness of the different porous media studied. Posteriorly, the samples were also submitted to Splitting Tensile Strength Tests in order to determine the mechanical strength and its relationship with the quality of injection of different porous media.

The combined use of ultrasound propagation velocity assessment techniques and ultrasonic tomography is a very valuable tool in measuring the internal structural morphology of the models created, allowing to obtain quantitative and qualitative information on the porous media under study. It should also be noted that, in an injection of grout, the probability of lack of a wall's structural monolithism is substantially reduced when there is a good filling and grout bonding with the materials in the wall. The risk of brittle collapse, characterized by detachment of the exterior masonry leaves, is thereby reduced.

Keywords: ultrasound, ultrasonic tomography, grout injection, porous media, mechanical tests

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos.....	2
1.3. Materiais estudados	2
1.3.1. <i>Grout</i>	2
1.3.2. Material calcário.....	3
1.3.3. Material cerâmico.....	3
1.3.4. Meios porosos injectados	5
1.4. Método de injeção	6
1.5. Organização e estruturação do texto.....	6
2. PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS	9
2.1. Tipos de ondas.....	9
2.1.1. Ondas longitudinais (ondas de compressão)	9
2.1.2. Ondas transversais	9
2.1.3. Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh	9
2.2. Ultra-som.....	10
2.3. Frequência, velocidade de propagação e comprimento de onda	11
2.3.1. Frequência	11
2.3.2. Velocidade de propagação.....	11
2.3.3. Comprimento de onda	11
2.4. Campo próximo e campo longínquo	12
2.4.1. Campo próximo ou zona de Fresnel.....	12
2.4.2. Campo longínquo ou zona de Fraunhofer	13
2.5. Atenuação sónica.....	13
2.5.1. Absorção.....	14
2.5.2. Dispersão	14
2.5.3. Notas sobre atenuação sónica.....	15
2.6. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	15
2.6.1. Metodologia.....	15
2.6.2. Análise e discussão dos resultados	17
3. AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS	29
3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	30
3.2. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	31
3.3. Condicionantes da eficiência do processo de injeção	33
3.4. Análise e discussão dos resultados	36

3.4.1.	Meio poroso C	36
3.4.2.	Meio poroso D	40
3.4.3.	Meio Poroso E	43
3.5.	Resultados em amostras obtidas a partir de outro método de injeção	45
3.6.	Notas sobre a utilização do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons	49
4.	TOMOGRAFIA ULTRA-SÓNICA	51
4.1.	Procedimento	51
4.2.	<i>Software</i>	52
4.3.	Análise e discussão dos resultados	58
4.3.1.	Calcário	58
4.3.1.1.	Meio poroso C	60
4.3.1.2.	Meio poroso D	64
4.3.1.3.	Meio poroso E	66
4.3.2.	Cerâmica	68
4.3.2.1.	Meio poroso C	69
4.3.2.2.	Meio poroso D	73
4.3.2.3.	Meio Poroso E	74
4.3.3.	Comparação entre as amostras de calcário e as amostras cerâmicas	75
4.3.4.	Comparação entre amostras obtidas a partir de diferentes métodos de injeção	82
4.3.5.	Alterações no procedimento iterativo	86
5.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	89
6.	BIBLIOGRAFIA	95
	ANEXOS	99

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Volume acumulado de intrusão/Volume total de intrusão [%] Vs Diâmetro dos poros [µm] [20]	4
Figura 1.2 – Intrusão acumulada de mercúrio (Hg) [mL/g] Vs Diâmetro dos poros [µm] [20].....	5
Figura 1.3 – Método de injeção [22]	6
Figura 2.1 - Propagação de onda devido a perturbação num só ponto [3]	12
Figura 2.2 – Propagação originada por 5 pontos de perturbação [3].....	12
Figura 2.3 – Campo sónico [36].....	13
Figura 2.4 – Medição efectuada numa das amostras através do método por transmissão directa.....	16
Figura 2.5 – Malha de 3 pontos: vistas de topo (esq.) e segundo os cortes A-A' e B-B' (dir.).....	17
Figura 2.6 – C,d: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	18
Figura 2.7 – C,w: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	18
Figura 2.8 – D,d e E,d: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	19
Figura 2.9 – D,w e E,w: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m].....	19
Figura 2.10 – Amostras secas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	20
Figura 2.11 – Amostras pré-molhadas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	20
Figura 2.12 – Amostras secas: C.V. da velocidade de ultra-sons [%] vs Distância entre transdutores [m]	23
Figura 2.13 – Amostras pré-molhadas: C.V. da velocidade de ultra-sons [%] vs Distância entre transdutores [m].....	23
Figura 2.14 – Meio poroso C, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m].....	24
Figura 2.15 – Meio poroso D, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m].....	24
Figura 2.16 – Meio poroso E, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m].....	25
Figura 2.17 – Amostras cerâmicas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]	26
Figura 2.18 – Esquema representativo da localização de água no interior de um meio poroso	27
Figura 3.1 – Esquema de localização dos cortes efectuados nas amostras.....	29
Figura 3.2 – Corte de amostra: plano aproximado	30
Figura 3.3 – Corte de amostra: plano geral	30
Figura 3.4 – Esq.: Vista de topo da malha pentagonal utilizada em cada fatia; Dir.: Vista lateral do posicionamento intermédio da malha na altura de cada fatia.....	31

Figura 3.5 – Esq.: Medição do diâmetro da fatia; Dir.: Medição da espessura da fatia	31
Figura 3.6 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, adaptado de [26]	32
Figura 3.7 – Aspecto de uma fatia de uma amostra de calcário após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral.....	32
Figura 3.8 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral	33
Figura 3.9 – A: Formação de um aglomerado flocular na entrada do poro; B: Formação de um aglomerado flocular no interior do poro [17]	34
Figura 3.10 – Esq.: partículas de ligante floculadas (sem superplastificante); Dir.: partículas de ligante dispersas (com superplastificante) [29]	35
Figura 3.11 – Face superior da fatia do meio referente ao meio poroso C seco de calcário	37
Figura 3.12 – Fatia do topo referente ao meio poroso C seco de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.).....	38
Figura 3.13 - Fatia do meio referente ao meio poroso C pré-molhado de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	38
Figura 3.14 - Fatia do topo referente ao meio poroso C pré-molhado de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	38
Figura 3.15 - Fatia do meio referente ao meio poroso C seco de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	39
Figura 3.16 - Fatia do topo referente ao meio poroso C seco de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	40
Figura 3.17 - Face superior da fatia da base referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico	43
Figura 3.18 - Fatia do meio referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	43
Figura 3.19 - Fatia do topo referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)	43
Figura 3.20 – Método de injeção com utilização de camada descontínua.....	46
Figura 4.1 - Malha de 6 pontos: vistas de topo (esq.) e segundo os cortes A-A' e B-B' (dir.)	52
Figura 4.2 – 3DTOM: separador <i>Model</i>	52
Figura 4.3 – 3DTOM: escolha do modelo adoptado	53
Figura 4.4 – Sistema de coordenadas adoptado.....	53
Figura 4.5 – 3DTOM: <i>Grid Parameters</i>	54
Figura 4.6 – 3DTOM: definição de unidades.....	54
Figura 4.7 – Exemplo de um ficheiro “.3DD” de uma das amostras	55
Figura 4.8 – 3DTOM: separador <i>Data</i>	55
Figura 4.9 – 3DTOM: separador <i>Options</i>	56

Figura 4.10 – 3DTOM: separador <i>Inversion Parameters</i> , definição das <i>Global Constraints</i>	57
Figura 4.11 – 3DTOM: separador <i>Run</i>	57
Figura 4.12 – 3DTOM: <i>Contour Options</i>	58
Figura 4.13 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras secas de calcário dos três meios porosos em estudo	58
Figura 4.14 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras pré-molhadas de calcário dos três meios porosos em estudo.....	59
Figura 4.15 - Meio poroso C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário	60
Figura 4.16 – Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	62
Figura 4.17 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	62
Figura 4.18 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário	62
Figura 4.19 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	63
Figura 4.20 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	63
Figura 4.21 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário.....	64
Figura 4.22 - Meio poroso D: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário	64
Figura 4.23 - Meio poroso E: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário.....	66
Figura 4.24 - Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras cerâmicas secas dos três meios porosos em estudo.....	68
Figura 4.25 - Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas dos três meios porosos em estudo	69
Figura 4.26 - Meio poroso C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente	70
Figura 4.27 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	70
Figura 4.28 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	71
Figura 4.29 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica	71

Figura 4.30 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	72
Figura 4.31 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	72
Figura 4.32 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica	72
Figura 4.33 - Meio poroso D: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente	73
Figura 4.34 - Meio poroso E: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente	74
Figura 4.35 – Meio poroso C, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica.....	76
Figura 4.36 - Meio poroso C, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica.....	76
Figura 4.37 - Meio poroso D, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica	77
Figura 4.38 - Meio poroso D, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica.....	78
Figura 4.39 - Meio poroso E, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica	79
Figura 4.40 - Meio poroso E, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica.....	79
Figura 4.41 - Meio poroso C, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	82
Figura 4.42 - Meio poroso C, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	83
Figura 4.43 - Meio poroso D, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	83
Figura 4.44 - Meio poroso D, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	84
Figura 4.45 - Meio poroso E, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	84
Figura 4.46 - Meio poroso E, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção	85

Figura 4.47 - Meio poroso C: tomogramas e fotografias representativas da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas na amostra seca de calcário segundo dois diferentes tipos de actualização do procedimento iterativo.....	87
Figura 4.48 - Meio poroso C: tomogramas e fotografias representativas da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas na amostra cerâmica seca segundo dois diferentes tipos de actualização do procedimento iterativo.....	87
Figura A.1 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	100
Figura A.2 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	100
Figura A.3 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário	100
Figura A.4 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	101
Figura A.5 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	101
Figura A.6 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário	101
Figura A.7 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	102
Figura A.8 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	102
Figura A.9 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário	102
Figura A.10 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário	103
Figura A.11 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário	103
Figura A.12 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário	103
Figura A.13 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	104
Figura A.14 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	104
Figura A.15 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica	104

Figura A.16 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	105
Figura A.17 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	105
Figura A.18 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	105
Figura A.19 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	106
Figura A.20 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	106
Figura A.21 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica	106
Figura A.22 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica	107
Figura A.23 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica	107
Figura A.24 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica	107

Índice de Quadros

Quadro 1.1 - Composição do grout injectado.....	2
Quadro 1.2 – Grout: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]	3
Quadro 1.3 – Pedra calcária: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]	3
Quadro 1.4 – Tijolo cerâmico: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]	3
Quadro 1.5 - Meios porosos injectados	5
Quadro 2.1 - Percentagem (%) de água presente entre as partículas do meio poroso em relação à massa total de água presente no meio poroso após 30min da injeção com água [20]	27
Quadro 3.1 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso C.....	36
Quadro 3.2 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso C	39
Quadro 3.3 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso D.....	40
Quadro 3.4 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso D	42
Quadro 3.5 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso E	44
Quadro 3.6 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso E.....	45
Quadro 3.7 - Velocidades de ultra-sons registadas nas amostras cerâmicas secas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção	46
Quadro 3.8 - Velocidades de ultra-sons registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção	47
Quadro 3.9 - Resistências à tracção por compressão diametral registadas nas amostras cerâmicas secas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção.....	47
Quadro 3.10 - Resistências à tracção por compressão diametral registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção	48

1.INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

O envelhecimento do património edificado constitui uma realidade que justifica a atenção e o interesse da sociedade, nomeadamente da comunidade científica especializada. Particularmente, os edifícios históricos afiguram-se como casos especiais dado o seu valor cultural e, como tal, devem ser alvo de atenção redobrada no que diz respeito à sua conservação. Neste sentido, são diversos os tipos de edificações que surgem como objecto de várias intervenções de modo a melhorar as respectivas condições de habitabilidade, segurança e conforto.

Tendo como alvo edificações vulneráveis quanto às condições referidas, as acções de consolidação são realizadas no sentido de melhorar o comportamento estrutural de alvenarias antigas, particularmente as resistências à compressão, à flexão e ao corte. O presente trabalho incide sobre uma das técnicas mais utilizadas de consolidação nas alvenarias: a injeção de *grouts* [4, 21, 35]. Esta técnica constitui-se como adequada para o restabelecimento da homogeneidade, continuidade e uniformidade de tensões dos panos de alvenaria antiga [27, 32, 34]. A sua utilização focaliza-se no cumprimento de dois objectivos fundamentais [21]:

- O preenchimento dos vazios e fendas existentes no sentido de aumentar a compacidade e, consequentemente, a resistência mecânica do meio injectado (alvenaria);
- A criação de ligações entre diferentes panos de alvenaria [5], vital em casos de deficientes ligações transversais.

Com vista à avaliação da eficiência da técnica de injeção de *grout* em diferentes meios porosos foram criados modelos com o objectivo de simular, com a maior fiabilidade possível, alvenarias antigas (meios porosos) com diferentes estruturas internas.

De referir que a presente dissertação foi elaborada em concomitância com a tese de doutoramento do Mestre Fernando Jorne e surge na sequência da realização de injeções de *grout* em diferentes meios porosos no contexto desse trabalho.

O presente trabalho seguiu o estudo anteriormente referido e incidiu, especificamente, na realização de ensaios de ultra-sons e tomografia ultra-sónica (ambos não destrutivos), no sentido de avaliar a qualidade das injeções e o seu efeito na compacidade dos diferentes meios porosos estudados [10, 13, 33]. A qualidade das injeções foi avaliada do ponto de vista da injectabilidade do *grout*, que traduz a capacidade de escoamento da mistura e de manutenção dessa característica por um período de tempo que permita uma injeção fácil e eficiente do elemento injectado. Este poder de penetração do *grout* depende de diversos factores quer de carácter intrínseco (por exemplo a granulometria da componente sólida da mistura), quer de carácter extrínseco como a morfologia do suporte (absorção/adsorção) e dos seus materiais constituintes (granulometria, superfície específica).

Posteriormente, realizaram-se também ensaios de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) das amostras, de forma a conhecer as suas resistências mecânicas e as respectivas relações com a qualidade de injeccção dos diferentes meios porosos.

A utilização combinada das técnicas supracitadas constitui-se como uma ferramenta muito útil na aferição da morfologia estrutural interna dos modelos criados, permitindo a obtenção de informações quantitativas e qualitativas sobre os meios porosos em estudo. É de especial relevância referir que, numa injeccção de *grout*, a probabilidade da existência de deficiência de monolitismo estrutural de uma parede é substancialmente diminuída aquando de um bom preenchimento e ligação do *grout* com os materiais presentes na parede. O risco de colapso frágil, caracterizado pelo destacamento dos panos exteriores de alvenaria [11], é dessa forma atenuado.

1.2. Objectivos

O presente trabalho tem como objectivo geral o estudo da técnica de injeccção de *grout* em alvenarias antigas com recurso a ensaios não destrutivos, nomeadamente através do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons. Durante este estudo, pretendeu-se avaliar a técnica de ensaio referida no sentido de compreender as suas especificidades e a sua influência nos resultados obtidos.

Pretendeu-se, igualmente, avaliar a utilização do ensaio de ultra-sons e a comparação dos resultados obtidos com ensaios mecânicos, nomeadamente através da determinação da resistência à tracção por compressão diametral das amostras previamente submetidas ao ensaio de ultra-sons.

Posteriormente, pretendeu-se avaliar a fiabilidade da utilização de tomografia ultra-sónica na avaliação da eficiência da injeccção de *grout* nos diferentes meios porosos referidos em 1.3.4.

1.3. Materiais estudados

1.3.1. *Grout*

A composição do *grout* utilizado nas injeccções apresenta-se no quadro 1.1. O ligante utilizado na sua formulação foi a cal hidráulica NHL5 (2009) da Secil-Martingança. A opção recaiu sobre este ligante devido ao facto de apresentar uma compatibilidade química, física e mecânica superior com os materiais originalmente presentes em alvenarias antigas comparativamente ao cimento [21]. De referir ainda que, com vista à melhoria das propriedades reológicas do *grout*, foi usado um superplastificante. Desta forma, não foi necessária a utilização de uma dosagem água/ligante muito elevada [22] para a obtenção de um *grout* com boa fluidez que consequentemente permitisse uma boa injectabilidade.

Quadro 1.1 - Composição do *grout* injectado

Ligante	Superplastificante	Relação água/ligante	% de Superplastificante
NHL5	Glenium Sky 617 (BASF)	0,5	1,2

Os resultados obtidos por Jorne [20] em provetes do material anteriormente referido relativos a diversas características deste tipo de *grout* são apresentados no quadro 1.2. Como é possível verificar, sobressaem as suas reduzidas massa volúmica e velocidade de propagação de ultra-sons, bem como uma porosidade elevada.

Quadro 1.2 – Grout: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]

	<i>Grout</i>
Diâmetro médio dos poros (volume) [μm]	0,108
Massa volúmica [g/cm^3]	1,44
Porosidade [%]	46,1
Velocidade de ultra-sons [m/s]	945

1.3.2. Material calcário

Obtido através da britagem de pedra calcária (origem sedimentar), o calcário estudado é um material com baixa porosidade, reduzido diâmetro médio dos poros e elevadas massa volúmica e velocidade de propagação de ultra-sons. Tais características podem constatar-se através dos resultados obtidos por Jorne [20] que se apresentam no quadro 1.3.

Quadro 1.3 – Pedra calcária: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]

	Pedra calcária
Diâmetro médio dos poros (volume) [μm]	0,038
Massa volúmica [g/cm^3]	2,60
Porosidade [%]	2,70
Velocidade de ultra-sons [m/s]	5044

1.3.3. Material cerâmico

O material cerâmico utilizado no presente trabalho teve origem em tijolos cerâmicos furados convertidos em partículas com as dimensões indicadas no ponto seguinte. Como é possível verificar através dos resultados obtidos por Jorne que se apresentam no quadro 1.4, as características específicas das partículas cerâmicas evidenciam diferenças significativas relativamente às partículas de calcário. Em particular, as partículas de material cerâmico apresentam uma massa volúmica inferior, um diâmetro médio dos poros cerca de catorze vezes superior, uma porosidade aproximadamente oito vezes superior e uma velocidade de propagação de ultra-sons inferior a metade relativamente às partículas de calcário (vd. quadro 1.3).

Quadro 1.4 – Tijolo cerâmico: diâmetro médio dos poros, massa volúmica, porosidade e velocidade de ultra-sons [20]

	Tijolo cerâmico
Diâmetro médio dos poros (volume) [μm]	0,520
Massa volúmica [g/cm^3]	2,00
Porosidade [%]	21,89
Velocidade de ultra-sons [m/s]	2253

A relação entre as dimensões dos poros existentes nas partículas de calcário e cerâmica pode, de resto, aferir-se a partir da análise da figura 1.1. Obtido através de comunicação particular de Jorne [20], o gráfico apresentado na figura 1.1 permite perceber que nas partículas cerâmicas estudadas não existe um diâmetro dominante dos poros, apresentando estes uma vasta gama de diâmetros. As partículas cerâmicas apresentam, neste aspecto, características muito distintas das evidenciadas pelas partículas de calcário que, como se pode observar, possuem poros nos quais é evidente a existência de um diâmetro claramente dominante e, conseqüentemente, uma reduzida gama de diâmetros.

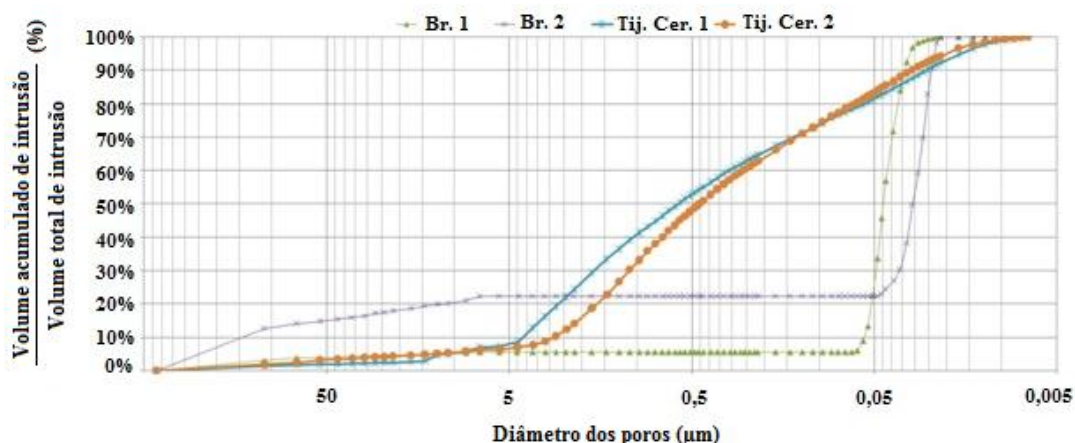


Figura 1.1 – Volume acumulado de intrusão/Volume total de intrusão [%] Vs Diâmetro dos poros [μm] [20]

No entanto, com uma porosidade cerca de oito vezes superior à existente nas partículas de calcário, o volume de vazios passível de ser preenchido por água nas partículas cerâmicas é superior na mesma medida relativamente às partículas das amostras de calcário. A relação entre a porosidade dos dois materiais referidos pode observar-se graficamente através da figura 1.2. O gráfico da fig. 1.2 [20] permite perceber a grande diferença existente entre as porosidades dos dois materiais, representadas na figura 1.2 pelas áreas localizadas abaixo das respectivas curvas. Como se pode observar, a área abaixo da curva de intrusão de mercúrio acumulado é largamente superior nas partículas cerâmicas relativamente ao ocorrido nas partículas de calcário ensaiadas.

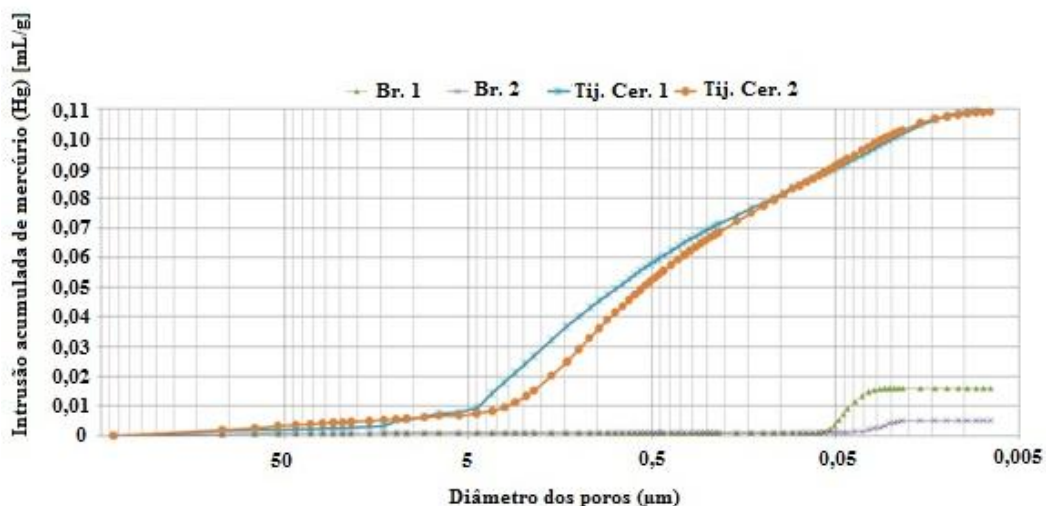


Figura 1.2 – Intrusão acumulada de mercúrio (Hg) [mL/g] Vs Diâmetro dos poros [μm] [20]

Por último, as amostras cerâmicas com partículas finas na sua composição apresentam ainda uma particularidade potencial. Sendo as suas partículas derivadas de elementos cerâmicos, é possível que surjam combinações com a cal através de reacções pozolânicas, originando produtos hidráulicos que contribuem para a melhoria do comportamento mecânico destas amostras.

1.3.4. Meios porosos injectados

Com vista à simulação de alvenarias com diferentes permeabilidades e volumes de vazios foram criados modelos representativos de alvenarias antigas, constituídos por cinco combinações de três diferentes tamanhos de partículas de material calcário e cerâmico, respectivamente [22]. Após a lavagem, secagem e peneiração dos materiais, foram obtidos cinco meios porosos com diferentes granulometrias, com designações de A a E, que se apresentam no quadro 1.5.

Quadro 1.5 - Meios porosos injectados

Meio poroso	Tamanho de partículas		
	0,15mm - 2mm (fino)	2mm - 4,75mm (médio)	4,75mm - 9,5mm (grosso)
A	1/3	1/3	1/3
B	1/3	-	2/3
C	1/6	-	5/6
D	-	1	-
E	-	1/2	1/2

Foi introduzido um factor diferenciador da injeção através do recurso a injeção prévia de água (pré-molhagem ou não dos meios porosos). Para todos os meios porosos foram realizadas injeções nos estados seco e molhado, de modo a aferir a influência que a pré-molhagem das amostras teria sobre a qualidade das injeções. Como objecto de estudo da presente dissertação foram apenas utilizadas as amostras respeitantes aos meios porosos C, D e E devido ao facto de nos meios A e B o

sucesso de injeção ter sido apenas parcial, o que não permitiu a obtenção de amostras em condições adequadas para o ensaio com ultra-sons.

1.4. Método de injeção

Conforme anteriormente referido, o presente trabalho vem no seguimento de injeções de *grout* realizadas em amostras representativas de diferentes meios porosos. Para a simulação da injeção de *grout* em alvenarias antigas foram utilizados modelos simplificados. Estes modelos envolveram a utilização de cilindros acrílicos com 152 mm de diâmetro e 300 mm de altura, nos quais os meios porosos em estudo foram colocados para posterior injeção. As injeções foram realizadas segundo o método que se encontra ilustrado na figura 1.3, utilizando um sistema dispositivo baseado em trabalhos anteriores [14, 34].



Figura 1.3 – Método de injeção [22]

A injeção foi efectuada unidireccionalmente, da base para o topo, com uma pressão de 1 bar (0,1 MPa).

De referir que, possivelmente, a injeção no modelo apresentado proporcionou melhores condições de injeção relativamente a uma situação de uma alvenaria real, visto que no modelo existem mais vazios ligados entre si do que é expectável numa alvenaria real, especialmente no interior dos panos de alvenaria [7].

1.5. Organização e estruturação do texto

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos, visando o primeiro o enquadramento, os objectivos e a organização e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo consiste inicialmente numa abordagem teórica à propagação de ondas ultra-sónicas, seguida do estudo experimental das especificidades do ensaio de ultra-sons.

O terceiro capítulo, respeitante à avaliação da técnica de injeção de *grout*, começa por abordar diversos aspectos inerentes à utilização da técnica e dos materiais em estudo. Desenvolve-se, posteriormente, na análise dos resultados obtidos nos ensaios de velocidade de propagação de ultra-

sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras injectadas com *grout*, e encerra-se na elaboração de diversas notas sobre a avaliação da técnica de injeccção de *grout*.

No quarto capítulo é abordada a utilização de tomografia ultra-sónica na detecção de descontinuidades no interior de alvenarias injectadas com *grout*.

O quinto capítulo apresenta as conclusões globais do trabalho, nomeadamente através da referência de todas as inferências realizadas sobre os estudos dos capítulos segundo, terceiro e quarto, e são referidas diversas possibilidades para desenvolvimentos futuros no contexto da temática abordada no presente trabalho.

Finalmente, a bibliografia e os anexos são apresentados autonomamente.

2. PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRA-SÓNICAS

2.1. Tipos de ondas

O ensaio por ultra-som é realizado com o uso de ondas mecânicas ou acústicas colocadas no meio em inspecção. Qualquer onda mecânica é composta por oscilações de partículas no meio em que se propaga. À passagem de energia acústica, as partículas constituintes do meio oscilam em torno da sua posição de equilíbrio, num movimento de amplitude decrescente com o tempo em decorrência da perda de energia adquirida pela onda [3].

Considerando um meio elástico, no qual as partículas podem oscilar em qualquer direcção, podem definir-se os quatro tipos de ondas acústicas abordados em seguida.

2.1.1. Ondas longitudinais (ondas de compressão)

Este tipo de ondas caracteriza-se pela oscilação das partículas na direcção de propagação da onda, podendo ser transmitidas a materiais nos estados sólido, líquido ou gasoso [3].

O meio elástico ao vibrar na direcção de propagação da onda (longitudinal) origina “zonas de compressão” e “zonas diluídas”. Perante esta oscilação, o comprimento de onda (λ) é definido como a distância entre duas zonas de compressão.

Segundo o processo de propagação descrito, as ondas longitudinais atingem elevadas velocidades, que variam consoante as características do meio.

2.1.2. Ondas transversais

As ondas transversais definem-se pela vibração das partículas do meio na direcção perpendicular à direcção de propagação da onda. Este tipo de ondas só pode ser transmitido a sólidos, sendo praticamente incapazes de se propagar em líquidos e gases devido às características das ligações entre as partículas desses meios. O comprimento de onda neste caso é a distância entre duas “cristas” ou dois “picos” consecutivos.

2.1.3. Ondas superficiais ou ondas de Rayleigh

Têm esta designação pela característica de se propagarem na superfície dos sólidos. Devido à complexidade do movimento oscilatório das partículas de superfície, as ondas superficiais apresentam velocidades de propagação entre duas fases diferentes aproximadamente 10% inferiores às de uma onda transversal.

O tipo de ondas superficiais que não possui componente normal, isto é, que se propaga paralelamente à superfície e transversalmente à direcção de propagação, designa-se ondas de “Love”. A sua aplicação limita-se à análise de materiais de finas camadas que recobrem outros materiais, como por exemplo argamassas.

Outro tipo diferente de ondas superficiais, que se propaga com um comprimento próximo ao da espessura do material ensaiado, é designado por ondas de “Lamb”. Este tipo de ondas permite a análise não só superficial, mas para todo o material. As ondas de “Lamb” geram-se a partir das ondas longitudinais que incidem segundo um ângulo de inclinação relativamente à camada de material a analisar.

No entanto, a utilização de ondas superficiais para análise de materiais deve ser bastante restrita, uma vez que os defeitos detectados são maioritariamente superficiais e para esse tipo de análise existem outros tipos de ensaios não destrutivos mais simples e económicos, como são os casos dos líquidos penetrantes e das partículas magnéticas.

2.2. Ultra-som

As radiações ultra-sónicas foram descobertas por Pierre e Marie Curie. Com a aplicação de uma corrente eléctrica senoidal sobre um cristal de quartzo posicionado entre duas placas metálicas, observaram a geração de uma vibração de alta frequência, posteriormente definida como ultra-som. Este processo foi denominado de efeito piezoeléctrico ou propriedade de piezoelectricidade.

O ultra-som é uma onda mecânica longitudinal com frequência acima de 20KHz, não audível. Ondas cuja frequência seja inferior a 20 Hz classificam-se como infra-sónicas ou sub-sónicas [3].

As ondas sonoras resultam de uma série de compressões e rarefações mecânicas na direcção do trajecto da onda, sendo por isso designadas como ondas longitudinais. Podem ocorrer nos meios sólido, líquido ou gasoso e devem-se à compressão e separação regular de moléculas.

A passagem dessas ondas de compressão através da matéria é devida à vibração das moléculas em torno da sua posição média como resultado da onda sonora.

A aplicação de uma vibração sonora a um meio implica a sua sobreposição aos movimentos existentes, somando-se a estes. Disto resulta que a onda de energia sonora regular tem tendência a tornar-se aleatória à medida que a energia por si cedida para movimentos moleculares particulares se dissipa em colisão com outras moléculas.

Dessa forma, a energia sonora é constantemente convertida em energia térmica. A taxa dessa conversão varia de acordo com a natureza do material, isto é, da forma como as moléculas oscilam e da frequência da onda sonora. A razão entre transmissão e absorção de ondas sonoras difere de material para material e varia com a frequência da energia sonora.

As ondas ultra-sónicas são geradas por transdutores que convertem a energia eléctrica em mecânica e a energia mecânica em eléctrica. Estas conversões ocorrem graças ao cristal, adequadamente cortado, localizado no interior do transdutor, cujo formato se modifica sob influência de uma carga eléctrica. Esse efeito é designado como piezoeléctrico.

O ensaio por ultra-som representa então um método não destrutivo que tem como objectivo a detecção de descontinuidades internas, presentes nos mais diversos tipos de materiais. Este ensaio

constitui uma inspecção não destrutiva com vista à diminuição do grau de incerteza sobre o estado do interior de um material ou elemento construtivo [10, 12, 15].

2.3. Frequência, velocidade de propagação e comprimento de onda

2.3.1. Frequência

As ondas acústicas são classificadas de acordo com as suas frequências (representadas por “f”) e medidas em ciclos por segundo. A unidade “ciclos por segundo” é designada por “Hertz”, abreviada por “Hz”.

Desta forma, um som com 280Hz significa que num segundo passam 280 ciclos ou ondas pelos nossos ouvidos. Ondas acústicas com frequência de valor superior a 20.000Hz não são detectáveis pelo ouvido humano, sendo por isso esta designada de frequência ultra-sónica. Considera-se assim o valor de 20KHz como o limite superior audível, sendo os valores de frequências superiores designados por frequência ultra-sónica [3, 30].

2.3.2. Velocidade de propagação

Velocidade de propagação (representada por “V”) define-se como a distância percorrida pela onda sónica por unidade de tempo e depende das propriedades do meio no qual a onda se propaga. A velocidade de propagação varia com a massa volúmica do material, sendo tanto maior quanto mais denso for o material. Desta forma, variações significativas da variação da velocidade de transmissão denunciam alterações relevantes nas características dos materiais onde a onda se propaga [3, 19, 30].

2.3.3. Comprimento de onda

Define-se como sendo a distância entre dois valores repetidos num padrão de onda [3]. A sua representação é feita pela letra grega Lambda “λ”.

A relação entre as três definições anteriores verifica-se da seguinte forma:

$$V = \lambda \cdot f \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Segundo esta relação, é possível calcular o comprimento de onda uma vez que a velocidade pode ser conhecida e depende apenas do modo de vibração e do meio em estudo, assim como a frequência também pode ser conhecida pelas definições do aparelho e depende somente da fonte emissora. É importante conhecer o comprimento de onda uma vez que está directamente relacionado com o tamanho da descontinuidade que se pretende detectar. Geralmente, o menor diâmetro de uma descontinuidade que se consegue detectar é da ordem de $\lambda/2$ [3].

2.4. Campo próximo e campo longínquo

2.4.1. Campo próximo ou zona de Fresnel

O ultra-som tem sido referido, no presente texto, como origem de uma única onda senoidal que atravessa o meio em estudo, de acordo com o ilustrado na figura 2.1.

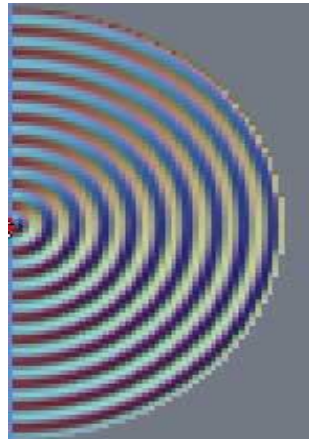


Figura 2.1 - Propagação de onda devido a perturbação num só ponto [3]

Ora, tendo o ultra-som origem em vários pontos ao longo da superfície do transdutor, o campo de som originado resulta da interacção ou interferência de tantas ondas quantos os pontos de perturbação. Na figura 2.2 ilustra-se o resultado da propagação acústica devido à perturbação em cinco pontos da superfície do transdutor.

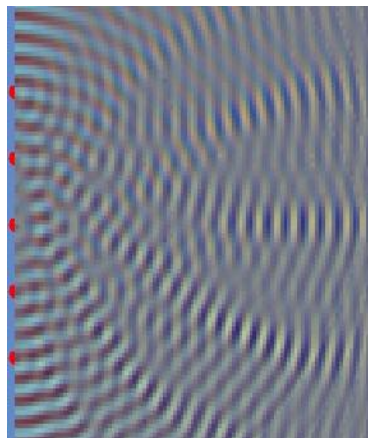


Figura 2.2 – Propagação originada por 5 pontos de perturbação [3]

Como é perceptível pela figura 2.2, nas proximidades do cristal evidencia-se uma zona com elevada interferência entre as diferentes ondas. Com o aumento da distância relativamente ao cristal, as interferências vão diminuindo e desaparecendo, resultando a propagação das várias ondas numa única frente de onda. Define-se então como *campo próximo*, a zona próxima do cristal onde ocorrem os fenómenos de interferência ondulatória. A extensão (N) do *campo próximo* varia em função do

diâmetro efectivo do cristal (D_{ef}), da frequência ultra-sónica (f) e da velocidade de propagação (V), e calcula-se a partir da seguinte fórmula:

$$N = \frac{D_{ef}^2 \cdot f}{4 \cdot V} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Para efeitos práticos, o campo próximo constitui uma zona onde existe uma maior dificuldade de avaliação ou detecção de pequenas discontinuidades. Desta forma, o ensaio de ultra-sons deve ser conduzido tendo em atenção esta grandeza e a localização das discontinuidades que se pretendam detectar.

2.4.2. Campo longínquo ou zona de Fraunhofer

À região do campo sónico imediatamente seguinte à descrita anteriormente dá-se o nome de *campo longínquo*. Nesta região, a onda sónica apresenta uma divergência igual à do feixe de luz de uma lanterna relativamente ao eixo perpendicular à superfície do transdutor. O *campo longínquo* é a região onde as discontinuidades existentes no meio submetido à propagação sónica podem ser detectadas. De acordo com o descrito, o *campo sónico* pode admitir-se como tendo a forma ilustrada na figura 2.3.

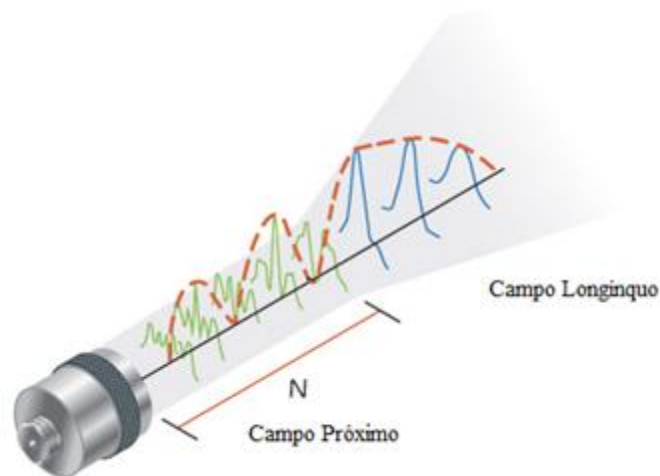


Figura 2.3 – Campo sónico [36]

2.5. Atenuação sónica

A propagação de uma onda acústica num determinado meio está sujeita a um decaimento que pode ter origem em mecanismos físicos de duas categorias: absorção (perdas no meio) e dispersão (perdas em fronteiras).

A atenuação decorrente de fenómenos de absorção (α_a) tem maior significância quando o volume do meio de transmissão é grande, como no caso de transmissão na água ou no ar. Por sua vez,

a atenuação devida a efeitos de dispersão é mais significativa quando se pretende estudar pequenos volumes, como no estudo de materiais por ultra-sons.

2.5.1. Absorção

A atenuação sónica relacionada com absorção pode ser dividida em três tipos: condução térmica, trocas de estados ou histerese e de origem viscosa [23].

A propagação de uma onda acústica origina deformações do meio e, consequentemente, zonas onde existe um aumento de temperatura (zonas de compressão) e zonas onde existe uma diminuição de temperatura (zonas de expansão). Tais fenómenos originam perdas por condução térmica que são proporcionais ao quadrado da frequência e ocorrem apenas na propagação de ondas longitudinais, estando as ondas transversais dissociadas de alterações dos volumes elementares durante a sua propagação.

Por sua vez, as perdas por trocas de estados ou histerese são devidas à presença de grandes cadeias moleculares em alguns líquidos, vidros e polímeros. Estas cadeias sob influência de ondas acústicas sofrem uma reorganização irreversível, causando perdas. Este tipo de perdas é proporcional à frequência e não se aplica ao presente trabalho, uma vez que não foram estudados materiais associados a este tipo de perdas.

Finalmente, as perdas de origem viscosa são o principal mecanismo responsável pela atenuação por absorção em sólidos e líquidos. A causa deste tipo de perdas é o movimento de partículas vizinhas com velocidades diferentes como resultado da propagação de uma onda acústica. As perdas por absorção de origem viscosa (α_v) são directamente proporcionais ao quadrado da frequência angular e inversamente proporcionais ao cubo da velocidade, de acordo com a equação seguinte:

$$\alpha_v = \frac{\eta \omega^2}{2 V^3 \rho} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

sendo:

η – coeficiente de viscosidade [N.s/m²]

ω – frequência angular

V – velocidade de propagação

ρ – massa específica

2.5.2. Dispersão

Os mecanismos de dispersão resultam da heterogeneidade dos materiais, cujas variações de estrutura podem ter origens diversas. Mesmo um material composto apenas por um único tipo de cristal pode apresentar dispersão, quando submetido à propagação de ondas acústicas. Caso os grãos

constituintes estejam orientados de forma a originar diversas propriedades elásticas e diferentes velocidades de propagação em diferentes direcções, estar-se-á perante um fenómeno de anisotropia.

A dispersão consiste na sucessão de incidências de uma onda em fronteiras oblíquas (fronteiras de grãos), da qual resultam uma onda reflectida e outra transmitida, com orientações arbitrárias, a cada fronteira atingida [30]. A onda original é então sucessivamente fracionada ao longo do seu percurso e parcialmente convertida em calor, devido aos efeitos de absorção acima mencionados.

2.5.3. Notas sobre atenuação sónica

Ambos os tipos de atenuação referidos originam limitações na análise de materiais. A absorção atenua a energia do sinal transmitido. Ainda assim, é possível contrariar este efeito através do aumento do sinal emitido, com a amplificação no sistema de recepção ou ainda através da utilização de uma frequência mais baixa. No caso em estudo, e com os equipamentos disponíveis, a única grandeza utilizada como variável foi a tensão de excitação (sinal emitido), tendo sido possível a confirmação da tendência acima referida para essa variável.

Quanto à dispersão, os problemas causados pelos seus efeitos afiguram-se de resolução mais complicada. Ao pretender detectar-se um defeito no interior de um material, este pode ser confundido, por exemplo, com as fronteiras de um grão, levando à introdução de ruído e, consequentemente, à impossibilidade de recuperação do sinal pretendido. A resolução deste problema não passa, como anteriormente, pelo aumento do sinal emitido pois conduziria, também, ao aumento do ruído. Neste caso, a única solução é a diminuição da frequência de trabalho. Mais uma vez é importante referir que segundo os equipamentos disponíveis, a única grandeza estudada como variável foi o sinal emitido, como tal, a frequência não foi alterada de forma a reduzir os efeitos de dispersão.

2.6. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

2.6.1. Metodologia

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons assenta no princípio de propagação das ondas elásticas, o qual define que a velocidade de propagação das ondas depende das propriedades elásticas do meio. Desta forma, a velocidade de propagação é tanto maior quanto maior for a massa volúmica do material, visto que a propagação da onda se efectua de forma mais rápida através da vibração das partículas sólidas constituintes do meio. A variação da velocidade de transmissão permite assim a detecção de alterações relevantes das características dos materiais submetidos a ensaio [5, 10, 15, 16].

Após a secagem das amostras numa estufa a uma temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ e o posterior arrefecimento até à temperatura ambiente [18], procedeu-se à realização do ensaio de acordo com a norma ASTM C597-02 [2], segundo o método por transmissão directa (*trough-transmission*) ilustrado

na figura 2.4. Este método consiste na colocação de um transdutor emissor de um dos lados do corpo a ensaiar e de um transdutor receptor na face oposta. Entre os transdutores e as amostras foi colocado um agente de ligação, neste caso um gel para ultra-sons, de modo a evitar a formação de bolsas de ar. Foi utilizado um equipamento do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*) LAB da PROCEQ, que emite um impulso eléctrico de baixa frequência ultra-sónica. Garantindo um bom acoplamento entre o material a ensaiar e os transdutores, procedeu-se à medição dos tempos (T em s) que o impulso emitido levou a percorrer as distâncias (L em m) desde o transmissor até ao receptor.



Figura 2.4 – Medição efectuada numa das amostras através do método por transmissão directa

A velocidade de ultra-sons foi então obtida do seguinte modo:

$$V = \frac{L}{T} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Utilizou-se um transdutor cónico de 54kHz e o ganho máximo permitido pelo equipamento (100x).

O ensaio de ultra-sons foi realizado, nesta fase, através da utilização de uma malha de três pontos ao longo da altura das amostras e da variação do sinal emitido em busca de conclusões sobre a sua relação com as velocidades de propagação ultra-sónica.

A malha ou grelha de pontos utilizada nesta fase do trabalho está ilustrada na figura 2.5 e baseou-se numa metodologia desenvolvida pela equipa de investigação do projecto [20]. Foram marcados três pontos distando 8 cm entre si, com o ponto inferior a 4cm da base, ao longo de quatro linhas longitudinais às amostras perpendiculares com os topos.

As quatro linhas referidas uniram verticalmente quatro pontos da base a quatro pontos do topo da amostra, dos quais dois pares constituíam os extremos de dois diâmetros ortogonais entre si nas faces referidas.

Nesta fase, foram medidos os tempos de propagação das ondas ultra-sónicas segundo todas as trajectórias entre dois pontos pertencentes a linhas verticais diametralmente opostas da malha, fazendo-se variar apenas o sinal emitido para verificar a sua influência nos tempos de propagação registados segundo todas as trajectórias. O valor do sinal emitido variou entre os valores de 125V, 250V e 500V. A esta fase de ensaios foram apenas submetidas as amostras de material calcário.

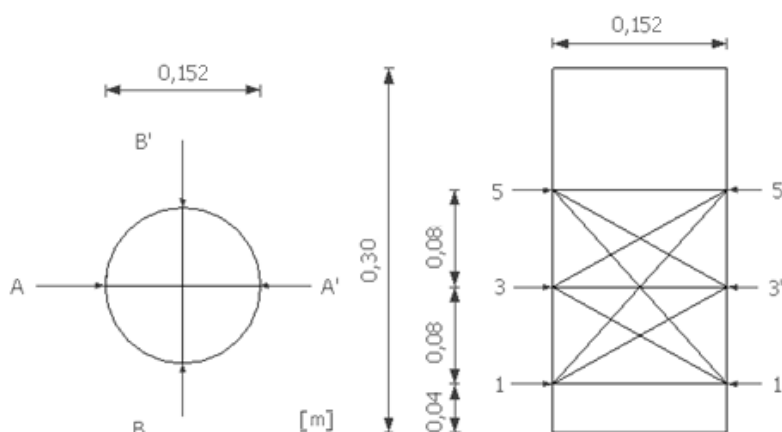


Figura 2.5 – Malha de 3 pontos: vistas de topo (esq.) e segundo os cortes A-A' e B-B' (dir.)

2.6.2. Análise e discussão dos resultados

Após a realização dos ensaios foi possível inferir a existência de diversas tendências, quer de carácter global (transversais a todos os meios porosos), quer de carácter mais particular (respeitantes apenas a um tipo de meio poroso ou preparação das amostras antes da injeção).

Começando pela análise do meio poroso C, verificou-se existência de uma relação clara e acentuada de diminuição da velocidade de ultra-sons com o aumento da distância entre transdutores, como se pode verificar nas figuras 2.6 e 2.7. Esta tendência deve-se ao facto de as amostras do meio poroso C aparentarem possuir uma significativa heterogeneidade de injectabilidade ao longo da altura de injeção. De referir que, a tendência supracitada foi verificada tanto na situação de estado seco do meio poroso (C,d) aquando da injeção, como no caso de pré-molhagem (C,w).

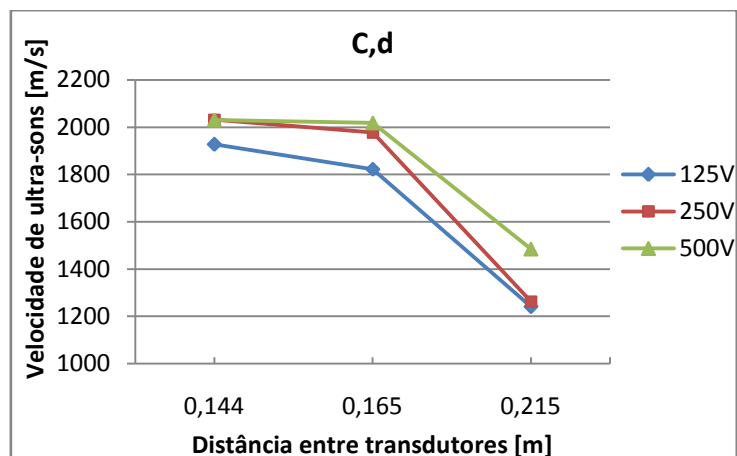


Figura 2.6 – C,d: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

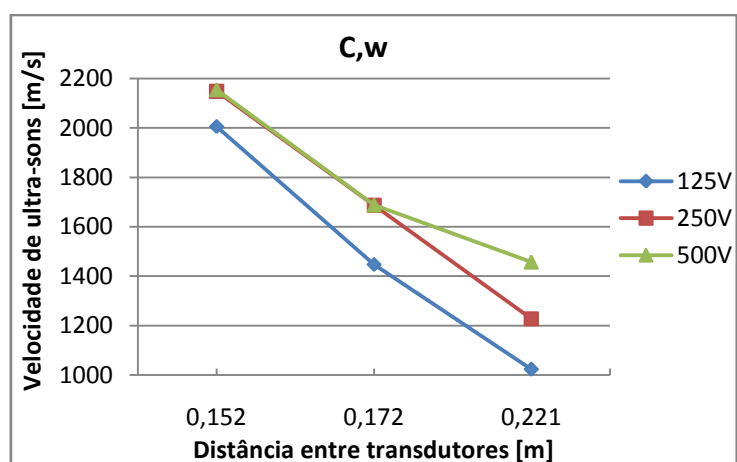


Figura 2.7 – C,w: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Nos meios porosos D e E a relação de diminuição da velocidade de ultra-sons com o aumento da distância entre transdutores também se verifica, embora de forma menos acentuada, e encontra-se patente nas figuras 2.8 e 2.9. A maior suavidade desta relação nos meios porosos D e E deve-se à aparente maior homogeneidade em termos de injectabilidade ao longo da altura das amostras destes meios porosos relativamente ao ocorrido nas amostras do meio poroso C.

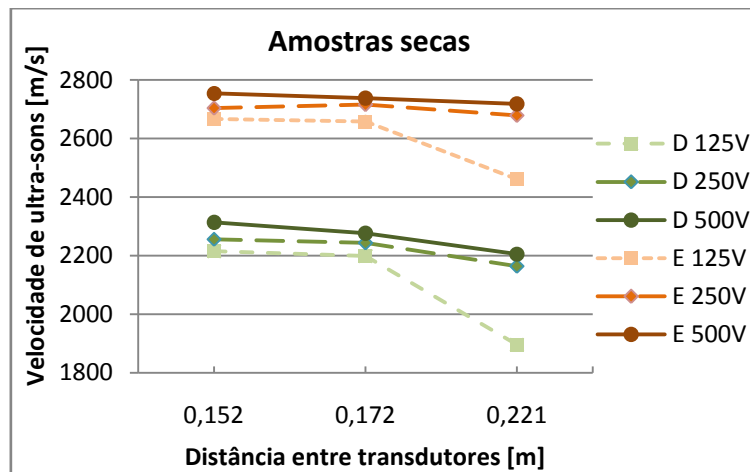


Figura 2.8 – D,d e E,d: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

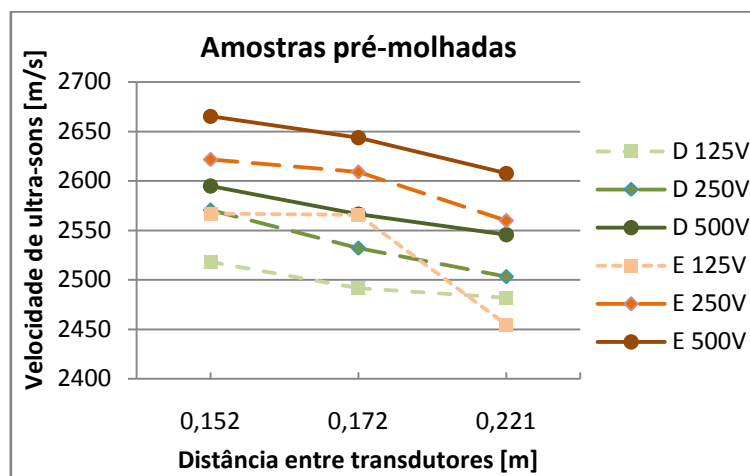


Figura 2.9 – D,w e E,w: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Em termos comparativos, as maiores velocidades de ultra-sons registadas ocorreram nas amostras do meio poroso E, seguidas das ocorridas nas amostras dos meios porosos D e C, respectivamente. Esta relação verificou-se tanto para as amostras secas, como também para as amostras pré-molhadas e pode verificar-se a partir das figuras 2.10 e 2.11. Tal deve-se à maior homogeneidade da injeção nas amostras dos meios porosos D e E que, consequentemente, origina meios porosos mais compactos. A maior compactidade resulta num menor volume de vazios que proporciona melhores condições de propagação acústica, uma vez que a velocidade de propagação no ar ronda os 300 m/s e é significativamente inferior à que se verifica nos meios sólidos. A inexistência de partículas finas nos meios porosos D e E origina uma menor quantidade de interfaces agregado-grout, levando assim a uma menor quantidade de perdas de energia por dispersão, o que proporciona maiores velocidades de propagação nestes meios.

Quanto às maiores velocidades registadas no meio poroso E relativamente ao meio poroso D, devem-se à existência de menos interfaces agregado-grout no meio E do que no meio D e, como tal, a

uma menor atenuação acústica por dispersão que origina a existência de maiores velocidades de propagação.

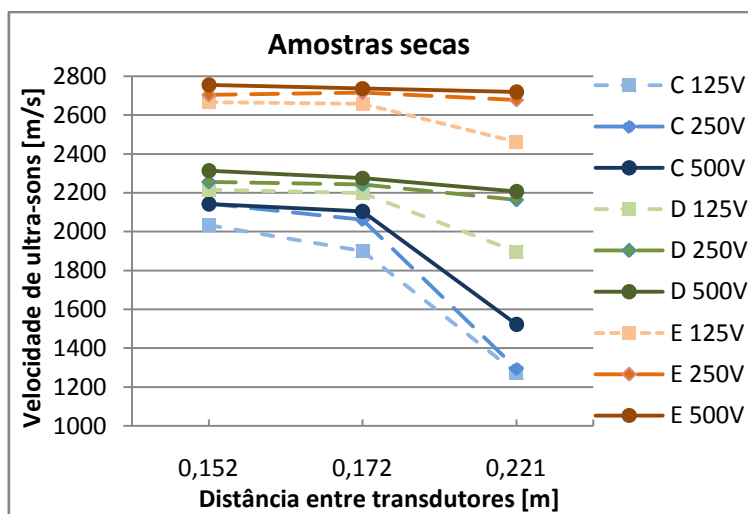


Figura 2.10 – Amostras secas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

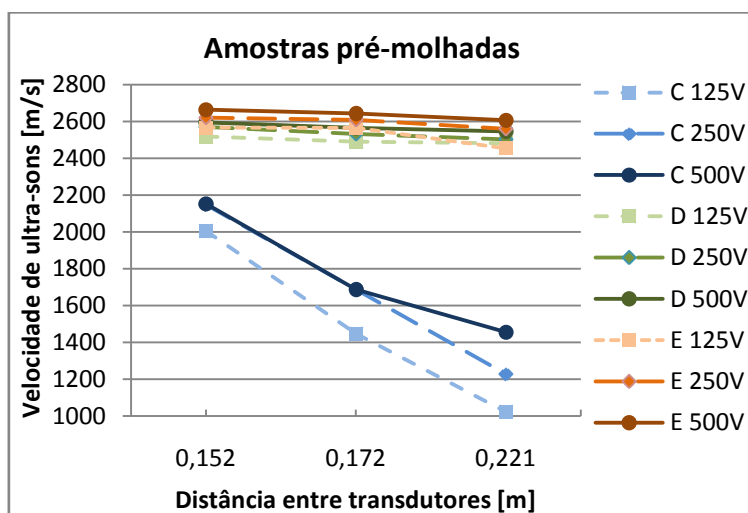


Figura 2.11 – Amostras pré-molhadas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Foi possível verificar também uma relação directa entre o aumento do sinal emitido e a velocidade de propagação acústica, válida para qualquer distância entre transdutores. Como é possível verificar nas figuras 2.10 e 2.11, as amostras apresentaram uma tendência crescente de variação de velocidade quando o sinal emitido foi alterado de 125V para 250V e de 250V para 500V. Esta tendência deve-se ao facto de o aumento do sinal emitido proporcionar menores perdas por absorção acústica no interior das amostras e originar, consequentemente, maiores velocidades de propagação. Como referido previamente, as perdas por absorção além de poderem ser diminuídas através do aumento do sinal emitido, podem ainda ser minimizadas através da amplificação do sistema de recepção ou com a utilização de uma frequência mais baixa. No caso em estudo a frequência foi

sempre mantida a 54kHz, enquanto o sistema receptor funcionou sempre na sua amplitude máxima (100x).

É importante também constatar que para além das maiores velocidades terem ocorrido com um sinal emitido de 500V, este é também o melhor valor de sinal estudado para a diminuição da extensão do *campo próximo*. De acordo com o referido em 2.4., a detecção de descontinuidades num meio submetido a propagação ultra-sónica não é possível de realizar de uma forma fiável na região do *campo próximo*. Ora, segundo a definição, a extensão do *campo próximo* apresenta uma variação inversa à da velocidade de propagação ultra-sónica. Visto que as maiores velocidades foram verificadas para um sinal de 500V e que tanto a frequência como o diâmetro dos transdutores não variaram, pode concluir-se que o mais benéfico, para efeitos de análise ultra-sónica, passa pela utilização de um sinal emitido de 500V.

Nas amostras pré-molhadas verificou-se uma tendência das velocidades de propagação serem semelhantes nos meios porosos mais grossos (meios D e E que não contêm partículas finas na sua composição). Esta tendência encontra-se explícita na figura 2.11 e pode explicar-se pelo facto da pré-molhagem dos meios porosos mais grossos proporcionar uma menor resistência à passagem do *grout*, que se traduz num melhor escoamento. A menor resistência origina uma perda inferior de energia por parte do fluxo de *grout*, resultante do reduzido coeficiente de atrito das partículas pré-molhadas e das menores forças de *Van der Waals* entre as paredes dos poros e o *grout*. Outro fenómeno evidenciado nas injeções dos meios porosos mais grossos foi a menor perda de água do *grout* (parte líquida da suspensão aquosa) para o meio poroso pré-molhado, originando um fluxo de *grout* mais elevado resultante de um melhor comportamento reológico.

Atendendo às menores resistências de escoamento nas amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se uma melhor penetração dos vazios existentes, resultando posteriormente numa injeção mais homogénea.

Em termos comparativos pode concluir-se também que a atenuação acústica verificada nas amostras do meio poroso C é superior à ocorrida nos meios D e E, como ficou evidente nas figuras 2.10 e 2.11. Tal diferença está relacionada com o maior número de interfaces agregado-*grout* no meio C, uma vez que possui partículas finas na sua composição. Ora, a grande quantidade das interfaces referidas traduz-se numa injectabilidade inferior deste meio relativamente aos demais e, consequentemente, o resultado da injeção é mais heterogéneo. Verifica-se que, após injectadas, as amostras deste meio apresentam maior quantidade de zonas não preenchidas pelo *grout*, contendo apenas ar. É esta maior quantidade de zonas não injectadas que causa uma atenuação acústica muito superior no meio poroso C, relativamente aos meios D e E, que se verifica graficamente através das suas velocidades inferiores.

Quanto ao coeficiente de variação das velocidades, verifica-se que apresenta maiores valores nas amostras do meio poroso C, como é possível observar nas figuras 2.12 e 2.13. Esta evidência

deve-se à maior heterogeneidade da injeção neste meio, independentemente da pré-molhagem ou não das amostras.

Igualmente no meio poroso C, verificou-se que o coeficiente de variação das velocidades foi superior no caso da pré-molhagem das amostras relativamente ao ocorrido no seu estado seco aquando da injeção. Este facto está relacionado com a existência de uma elevada pressão capilar neste meio, aquando da injeção com água, devida à existência de poros de pequeno diâmetro.

Como é possível verificar através da Equação de Washburn (Eq. 2.5), a pressão capilar é tanto maior quanto menor for o diâmetro dos poros:

$$p = \frac{-4.\sigma.\cos(\theta)}{d} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Com:

p - pressão capilar;

σ - tensão superficial do líquido;

θ - ângulo de contacto entre o líquido e o material;

d - diâmetro do poro.

Deste fenómeno de elevada pressão capilar resulta uma quantidade significativa de água absorvida pelo meio que, após o processo de cura, resulta na existência de vazios.

No que respeita à relação entre a evolução do coeficiente de variação da velocidade de propagação acústica e a alteração do sinal emitido, verificou-se que não existe uma tendência definida, como é possível observar nas figuras 2.12 e 2.13. Desta forma, é possível concluir que o aumento do sinal emitido não se traduziu num aumento da atenuação acústica por dispersão e, consequentemente, do ruído.

Quanto à relação entre a evolução do coeficiente de variação da velocidade de propagação acústica e a oscilação da distância entre transdutores, também não foi possível identificar uma tendência clara, como é perceptível nas figuras 2.12 e 2.13.

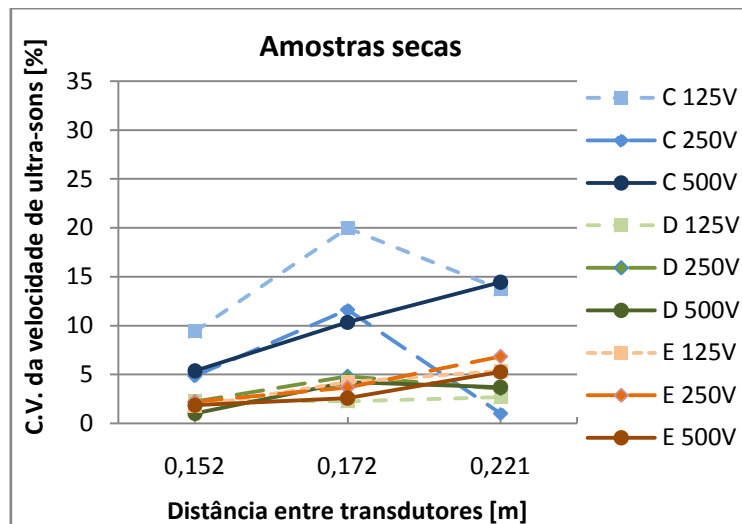


Figura 2.12 – Amostras secas: C.V. da velocidade de ultra-sons [%] vs Distância entre transdutores [m]

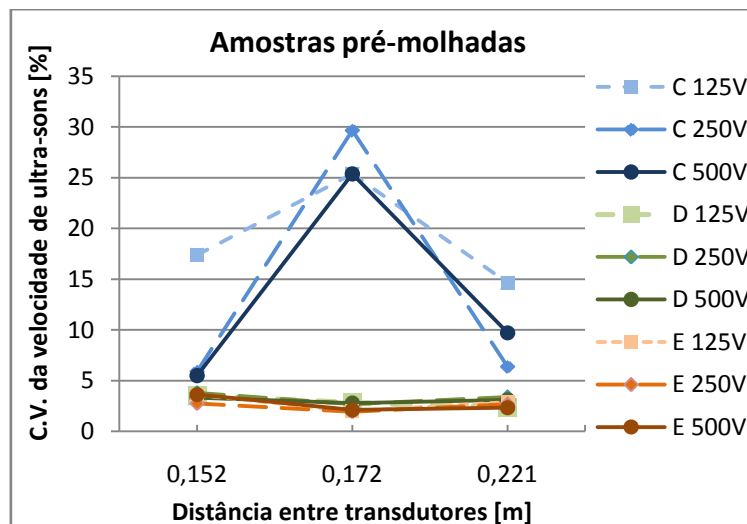


Figura 2.13 – Amostras pré-molhadas: C.V. da velocidade de ultra-sons [%] vs Distância entre transdutores [m]

Finalmente, comparando os resultados obtidos nos meios porosos de calcário com os correspondentes às amostras cerâmicas (resultados obtidos através de um sinal emitido de valor constante e igual a 500V), foi possível verificar que globalmente as velocidades superiores ocorreram nas amostras de calcário. Esta tendência pode entender-se como sendo resultado da maior massa volúmica das partículas de calcário relativamente às cerâmicas (vd. quadros 1.3 e 1.4).

Como é possível verificar através da figura 2.14, no meio poroso C, as velocidades registadas nas amostras de calcário foram globalmente superiores às verificadas nas amostras cerâmicas.

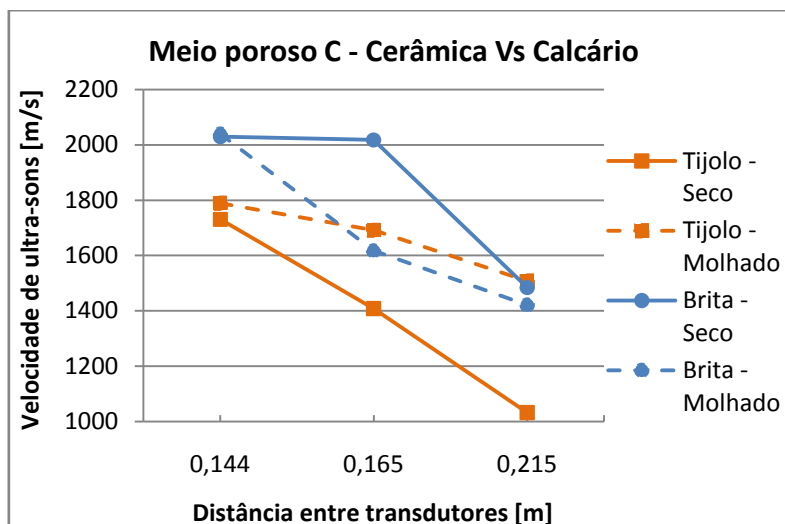


Figura 2.14 – Meio poroso C, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

De igual modo, a figura 2.15 evidencia a existência de velocidades superiores nas amostras de calcário relativamente às registadas nas amostras cerâmicas, desta vez no meio poroso D. Neste caso a diferença entre velocidades ocorridas nas amostras dos dois materiais foram mais significativas do que as equivalentes no meio poroso C.

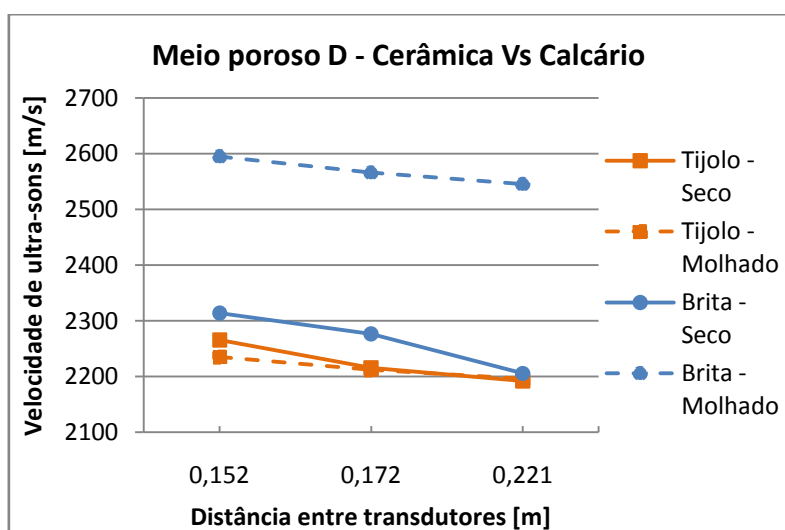


Figura 2.15 – Meio poroso D, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Finalmente, o meio poroso E foi o que registou maiores diferenças entre as velocidades ocorridas nas amostras de calcário e de cerâmica. Pela figura 2.16 pode constatar-se que, tal como nos outros meios porosos, as velocidades foram superiores nas amostras de calcário relativamente às ocorridas nas amostras cerâmicas.

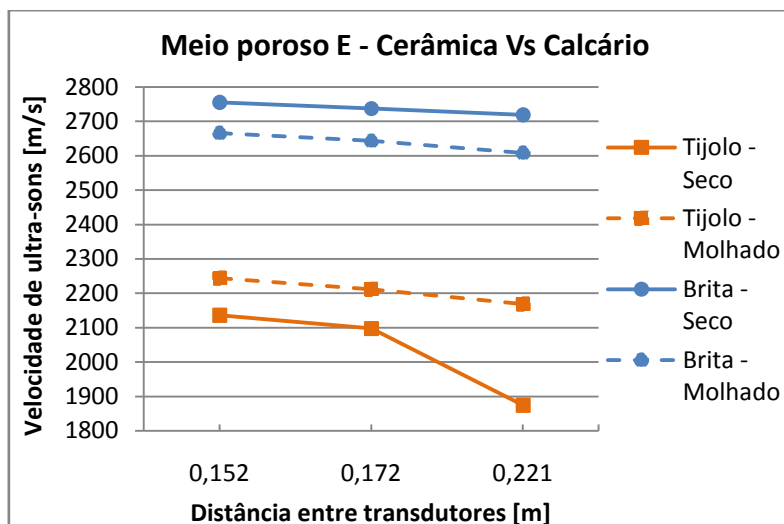


Figura 2.16 – Meio poroso E, Cerâmica Vs Calcário: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Quando comparados entre si, os resultados obtidos nas amostras cerâmicas são os apresentados na figura 2.17. Estes apresentam uma tendência igual à verificada nas amostras de calcário, isto é, as maiores velocidades foram registadas no meio poroso E, seguidas das verificadas nos meios D e C, respectivamente. A explicação é semelhante à apresentada para as amostras de calcário, ou seja, deve-se à maior homogeneidade da injeção nas amostras dos meios porosos D e E que, consequentemente, origina meios porosos mais compactos. A maior compactidade resulta num menor volume de vazios que proporciona melhores condições de propagação acústica. No mesmo sentido, acresce a não existência de partículas finas nos meios porosos D e E que origina uma menor quantidade de interfaces agregado-*grout*, e uma consequente menor quantidade de perdas de energia por dispersão que proporciona, também, a existência de maiores velocidades de propagação nestes meios.

Quanto à comparação entre os meios E e D, as diferenças devem-se à existência de menos interfaces agregado-*grout* no meio E do que no meio D e, como tal, a uma menor atenuação acústica por dispersão que origina a existência de maiores velocidades de propagação acústica.

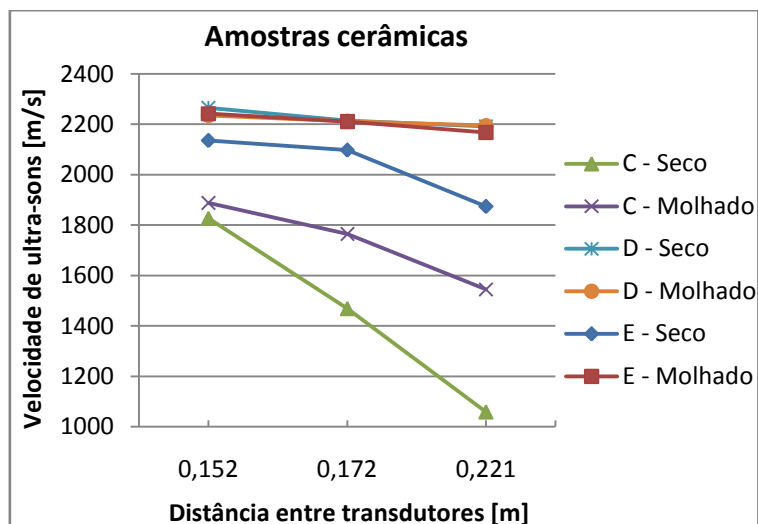


Figura 2.17 – Amostras cerâmicas: Velocidade de ultra-sons [m/s] vs Distância entre transdutores [m]

Por último, analisando as figuras 2.14, 2.15 e 2.16, verificam-se duas tendências opostas nas amostras de calcário e de cerâmica. Quanto às amostras cerâmicas, as velocidades registadas nas amostras pré-molhadas foram, em geral, superiores às ocorridas nas amostras secas. O contrário ocorreu nas amostras de calcário, onde as maiores velocidades foram maioritariamente registadas nas amostras secas.

Pode dizer-se que, no caso das amostras cerâmicas, as maiores velocidades registadas nas amostras pré-molhadas relativamente às registadas nas secas se deve à maior homogeneização da injeção nos meios porosos pré-molhados. A pré-molhagem dos meios porosos de material cerâmico permite que as partículas se encontrem humedecidas aquando da injeção do *grout*, originando melhorias sob o ponto de vista da sua fluidez. Ao penetrar num meio poroso humedecido, o *grout* perde menos água do que no caso de o meio poroso se encontrar seco aquando da injeção. Este fenómeno, atinge um contorno assinalável, atendendo à elevada capacidade de absorção de água por parte das partículas cerâmicas [22].

No que toca ao calcário, este aspecto não assume um papel determinante uma vez que a capacidade de absorção de água por parte das partículas é baixa. Por outro lado, esta baixa capacidade de absorção tem como consequência que após a pré-molhagem exista uma quantidade elevada de água entre as partículas do meio poroso, especialmente nos poros com menor diâmetro onde a pressão capilar é maior [24], o que posteriormente, aquando da fase de injeção de *grout*, tem como consequência uma não injeção nestes poros preenchidos com água. As características anteriormente descritas são confirmadas a partir dos resultados obtidos por Jorne [20], num estudo sobre as diferentes quantidades de água presentes nos meios porosos usados na presente dissertação e que se apresentam no quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Percentagem (%) de água presente entre as partículas do meio poroso em relação à massa total de água presente no meio poroso após 30min da injeção com água [20]

Material	Meio poroso	Água entre partículas / Água total - após 30min [%]
Cerâmica	A	24,2
	B	22,1
	C	19,8
	D	19,3
	E	16,8
Calcário	A	52,4
	B	45,3
	C	48,2
	D	34,2
	E	38,6

Segundo o quadro 2.1 está implícita a consideração de duas zonas distintas preenchidas por água nos meios porosos. A água entre partículas está presente na zona interparticular, isto é, entre as partículas do meio poroso. A água total diz respeito à soma da água presente entre as partículas com a água no interior das partículas. Esta última define-se como sendo a água localizada na zona intraparticular que é absorvida pelas partículas para o interior dos seus poros. As duas zonas, anteriormente descritas, onde a água pode estar localizada num meio poroso encontram-se ilustradas na figura 2.18.

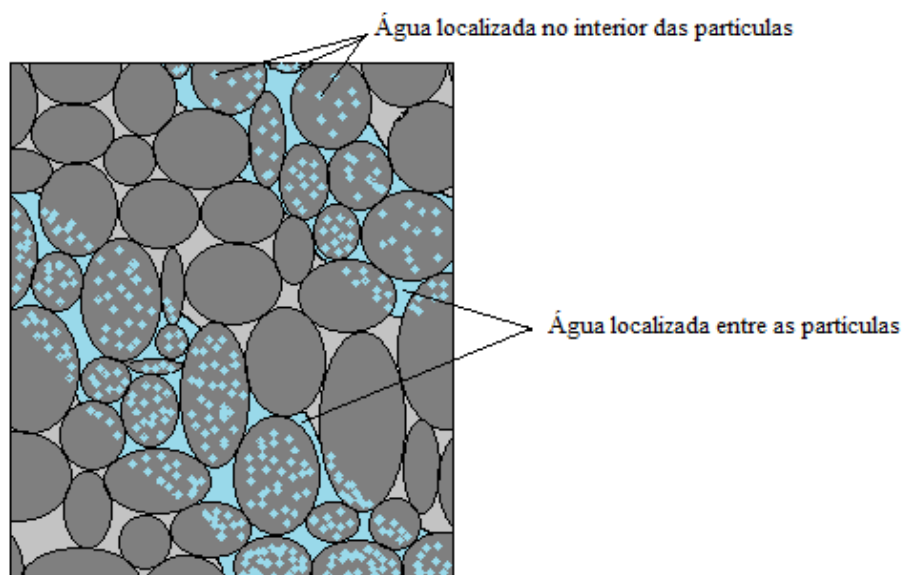


Figura 2.18 – Esquema representativo da localização de água no interior de um meio poroso

A fase de cura decorreu a uma temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ e em condições de humidade relativa de $65\pm 5\%$, numa sala controlada e climatizada, designada como Sc (“*Standard cure*”), durante a qual ocorreu a evaporação de água originando espaços vazios nesses locais.

Em função do fenómeno de evaporação anteriormente referido, pode compreender-se o facto de as maiores velocidades de ultra-sons registadas nos meios porosos de calcário terem ocorrido nas amostras secas aquando da injeção, uma vez que a água evaporada no processo de cura foi apenas a que se encontrava no *grout* injectado. Semelhantes resultados foram obtidos por Jorne [22].

3. AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ULTRA-SONS

Para a avaliação de cada uma das amostras injectadas procedeu-se à realização de dois tipos de ensaios distintos que serão abordados em seguida. Após o estudo da propagação de ondas ultra-sónicas efectuado no capítulo 2 do presente trabalho e da recolha dos dados necessários à elaboração da análise tomográfica (capítulo 4), as amostras de calcário e cerâmica foram sujeitas a cortes transversais de acordo com o esquema representado na figura 3.1 a 8, 16 e 24cm relativamente à face inferior da base. Destes cortes resultaram três fatias distintas de cada amostra: base (fatia localizada entre os 0 e os 8cm de altura da amostra), meio (fatia localizada entre os 8 e os 16cm de altura da amostra) e topo (fatia localizada entre os 16 e os 24cm de altura da amostra). A zona superior foi descartada.

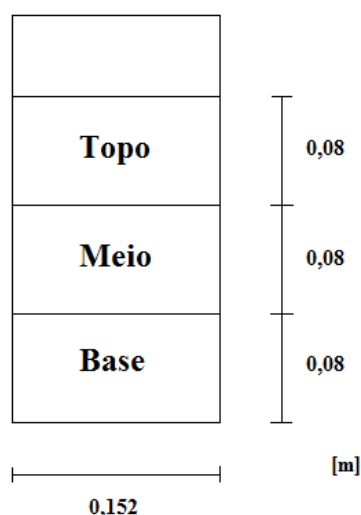


Figura 3.1 – Esquema de localização dos cortes efectuados nas amostras

O corte foi realizado a seco com recurso a uma máquina de corte *Jumbo* e a sua execução encontra-se ilustrada nas figuras 3.2 e 3.3. O procedimento a realizar foi apenas de marcação, fixação e corte das amostras nas zonas pretendidas.



Figura 3.2 – Corte de amostra: plano aproximado



Figura 3.3 – Corte de amostra: plano geral

3.1. Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

Posteriormente ao corte de cada amostra em três fatias, realizou-se o ensaio de velocidade de ultra-sons em cada uma. A sua realização foi efectuada do mesmo modo que o ensaio descrito em 2.6, isto é, foi conduzida de acordo com a norma ASTM C597-02 [2], segundo o método por transmissão directa. Foi utilizado o equipamento do tipo PUNDIT LAB descrito anteriormente e nas condições referidas em 2. Como verificado em 2.6, o valor de sinal emitido mais adequado (entre a gama de valores disponíveis) para a realização do ensaio de ultra-sons foi de 500V. Desta forma, o sinal emitido nesta fase foi mantido constante a 500V. Relativamente ao ensaio de ultra-sons já abordado, esta fase apresentou duas diferenças. Como objecto de estudo foram desta vez utilizadas as fatias resultantes do corte das amostras e não a sua totalidade. Igualmente específica para esta fase de ensaio foi a malha utilizada para medição das velocidades de propagação de ultra-sons. Neste caso, a malha de pontos foi disposta em forma de pentágono, localizada a meia altura de cada fatia e encontra-se ilustrada na figura 3.4 [20]. De referir que, na mesma figura, as distâncias a azul têm um comprimento de 14,5cm, enquanto as distâncias marcadas a vermelho têm um comprimento de 8,9cm.

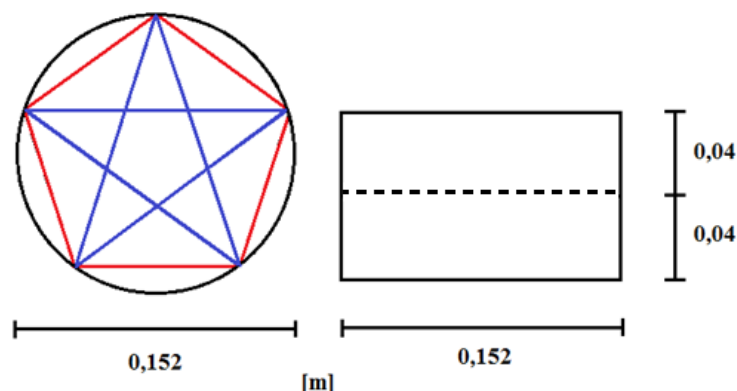


Figura 3.4 – Esq.: Vista de topo da malha pentagonal utilizada em cada fatia; Dir.: Vista lateral do posicionamento intermédio da malha na altura de cada fatia

3.2. Ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Após a realização do ensaio de velocidade de ultra-sons seguiu-se a realização do ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (*Splitting Tensile Strength Test*) de cada uma das fatias. Este ensaio requer, no entanto, o conhecimento das dimensões do provete e como tal foram realizadas medições em todas as fatias de modo a obter o diâmetro e a espessura médios. As medições foram efectuadas com recurso a uma craveira, como ilustrado na figura 3.5, e os valores utilizados para o cálculo final da resistência à tracção por compressão diametral resultaram da média de quatro medições quer do diâmetro, em quatro direcções distintas, quer da espessura das fatias, em quatro pontos distintos.



Figura 3.5 – Esq.: Medição do diâmetro da fatia; Dir.: Medição da espessura da fatia

Com o conhecimento destas dimensões, procedeu-se à realização do ensaio de acordo com a norma C 496/C 496M – 04 [1]. Este consiste na compressão do provete (neste caso, as fatias das amostras) através da aplicação de força em duas geratrizes diametralmente opostas, tal como ilustrado na figura 3.6, que consequentemente provoca o aparecimento de tracções na direcção perpendicular à força aplicada, originando a rotura do provete.

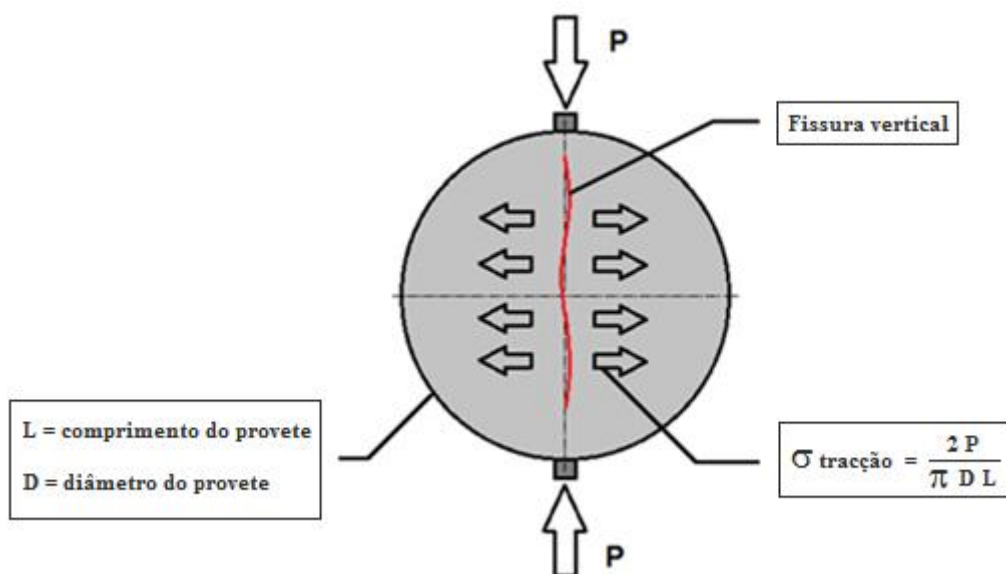


Figura 3.6 – Mecanismo de rotura de um provete submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, adaptado de [26]

Na figura 3.7 é possível observar um exemplo do aspecto real de um provete após submetido ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, ilustrando o mecanismo descrito anteriormente.



Figura 3.7 – Aspecto de uma fatia de uma amostra de calcário após um ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

O ensaio foi efectuado com uma máquina de tracção *Zwick Z050* com célula de carga de 50kN. Os parâmetros de funcionamento foram definidos com uma pré-carga no valor de 100N e uma deformação imposta de 0,7 mm/min. O sistema de ensaio descrito pode observar-se na figura 3.8.



Figura 3.8 – Sistema de ensaio de resistência à tracção por compressão diametral

Conhecido o valor da força de rotura P calcula-se a resistência à tracção por compressão diametral T segundo a fórmula:

$$T = \frac{2 P}{\pi L D} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

T – Resistência à tracção [MPa]

P – Força de rotura [N]

L – Comprimento do provete [mm]

D – Diâmetro do provete [mm]

3.3. Condicionantes da eficiência do processo de injeção

Para uma melhor compreensão do comportamento localizado nas diferentes zonas de cada uma das amostras é importante conhecer alguns tipos de fenómenos que podem ocorrer durante a sua injeção com *grout*.

Ao injectar-se um qualquer meio poroso com uma suspensão aquosa (no presente trabalho, *grout*) existem dois tipos de vazios distintos, passíveis de ser penetrados pela suspensão: os vazios do espaço intraparticular, referentes ao interior das partículas, e os vazios do espaço interparticular, referentes ao espaço existente entre as partículas constituintes do meio poroso. Devido à granulometria das partículas de ligante ser superior à dimensão dos poros do espaço intraparticular não é possível a realização de uma penetração efectiva desse espaço por parte das partículas sólidas do *grout*. Sempre que for referida a existência de penetração das partículas constituintes dos meios porosos pela

componente sólida do *grout*, esta referência deverá ser interpretada como uma penetração de carácter superficial e não suficiente para colmatar completamente os vazios existentes no espaço intraparticular. Ainda assim, a profundidade de alcance das partículas sólidas do *grout* nas partículas constituintes do meio poroso revelar-se-á mais adiante no presente trabalho como um factor decisivo no estabelecimento das ligações agregado-*grout* e, consequentemente, nas resistências mecânicas obtidas nos meios porosos injectados. O preenchimento efectivo dos vazios respeitantes ao espaço intraparticular deverá apenas ser admitido quando se falar de água uma vez que, sendo um fluido *newtoniano*, é capaz de penetrar efectivamente nos vazios existentes no interior das partículas, ao contrário da componente sólida de uma suspensão aquosa como é o caso do *grout*. O sucesso de uma injeção será interpretado no presente trabalho como a colmatação dos vazios existentes nos meios porosos injectados. No entanto, as características das partículas que compõem o meio poroso influenciam, em larga medida, o sucesso da injeção.

Relembrando a consideração inicial de cinco meios porosos com diferentes estruturas sólidas e a posterior focalização do estudo nos três meios porosos (C, D e E) dos quais resultaram amostras passíveis de ser estudadas, são evidentes as diferenças existentes entre as suas estruturas. Enquanto os meios porosos D e E apresentam estruturas sólidas mais homogêneas, o meio poroso C devido à maior heterogeneidade da sua granulometria, bem como à existência de partículas finas, tem maiores problemas na realização com sucesso de injeções de *grouts*.

Um exemplo de fenómeno com elevada probabilidade de ocorrência neste tipo de meios porosos é o de segregação ou filtração do *grout* à entrada dos poros existentes. Como é possível verificar através da figura 3.9, a existência de poros de dimensões muito reduzidas propicia a formação de aglomerados floculares constituídos pelas partículas sólidas do ligante que impedem a perfeita penetração no poro. A ocorrência destes fenómenos conduz a que o *grout* capaz de penetrar nos poros possua menos partículas de ligante do que seria ideal e seja assim mais fluído, com menor capacidade para efectuar ligações fortes entre o agregado e o *grout*. Em alguns casos, estes aglomerados floculares obstruem efectivamente a passagem do *grout* e originam a existência de zonas não preenchidas pelo *grout* que acabam por comprometer a resistência mecânica das fatias em estudo uma vez que correspondem a vazios, em alguns casos, de dimensões significativas.

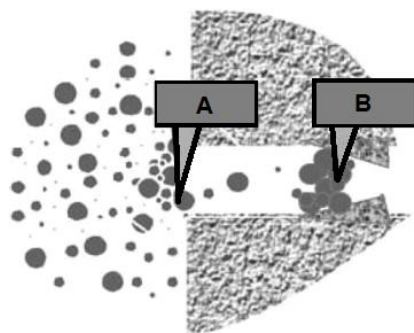


Figura 3.9 – A: Formação de um aglomerado flocular na entrada do poro; B: Formação de um aglomerado flocular no interior do poro [17]

No entanto, o fenómeno de filtração do *grout* pode ser atenuado através da utilização de superplastificantes. Sendo substâncias tensio-activas, isto é, capazes de alterar a tensão superficial do dissolvente (neste caso, a água), estes adjuvantes possuem moléculas alongadas com uma extremidade hidrófila e outra hidrófoba [29]. Desta forma, a adição de superplastificantes confere às partículas de ligante uma carga negativa superficial que provoca, consequentemente, a repulsão entre elas. O mecanismo de acção dos plastificantes pode compreender-se através da figura 3.10, na qual se observa a sua adsorção pela superfície das partículas de ligante provocando a desfloculação destas.

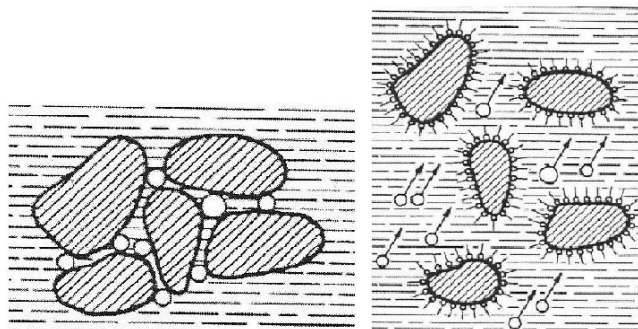


Figura 3.10 – Esq.: partículas de ligante floculadas (sem superplastificante); Dir.: partículas de ligante dispersas (com superplastificante) [29]

Ao adicionar-se um plastificante a uma suspensão aquosa as partículas sólidas repelem-se, permitindo que a água localizada entre elas não seja necessária para impor o seu afastamento, diminuindo desta forma a ocorrência de floculação [29]. Podendo as partículas localizar-se mais próximas umas das outras, dispensa-se a água livre que entre elas se situava anteriormente. No caso em estudo foi utilizado o superplastificante *Glenium Sky 617 (BASF)* mas, ainda assim, constatou-se a ocorrência do fenómeno de floculação em alguns casos, como se poderá verificar mais adiante na análise dos resultados dos ensaios referidos em 3.1 e 3.2. Outro aspecto condicionante dos meios porosos constituídos por partículas finas é a elevada superfície específica da sua estrutura. A inclusão de partículas finas num qualquer meio poroso conduz a que a área a envolver pelo *grout* injectado seja muito superior à existente em meios porosos com partículas de maiores dimensões, originando uma maior absorção de água por parte do meio poroso. Desta forma, o meio poroso C constitui-se como o mais condicionante no que diz respeito ao completo envolvimento das suas partículas por parte do *grout* devido à existência de partículas finas na sua composição.

Ainda relativamente ao meio poroso C, outra condicionante a considerar é a elevada pressão capilar do meio poroso resultante da porosidade fina. Esta pressão capilar, origina fenómenos de sucção da água do *grout* por parte do meio poroso e contribui para uma diminuição da relação água/ligante à medida que o *grout* avança no meio poroso. No sentido de proporcionar ao *grout* uma fluidez suficiente para a penetração dos vazios nas zonas mais afastadas do local de injeção, a relação água/ligante utilizada determinou-se tendo em conta as condicionantes supracitadas e foi, por isso, um pouco superior ao que seria recomendável num meio poroso constituído por partículas de maiores

dimensões. No entanto, esta elevada relação água/ligante apresenta a contrapartida de reduzir a densidade do *grout* e torná-lo menos resistente mecanicamente, bem como às suas ligações com as partículas do meio poroso.

Quanto aos meios porosos sem partículas finas na sua composição (D e E), a relação água/ligante utilizada foi igual à utilizada no meio poroso C. Tal opção visou garantir a equidade do material injectado para assim se poderem analisar e comparar os comportamentos registados entre os diferentes meios porosos.

3.4. Análise e discussão dos resultados

De forma a facilitar a compreensão do texto, a análise referida será efectuada separadamente para cada meio poroso. De referir que, neste ponto, os resultados dizem respeito aos ensaios efectuados às amostras com 120 dias decorridos desde a data das injeções de *grout* e representam, portanto, o comportamento a um prazo longo dos meios porosos em estudo quando injectados com *grout*.

3.4.1. Meio poroso C

Composto por 1/6 de partículas finas e 5/6 de partículas grossas, o meio poroso C apresentou resultados variáveis em função do material utilizado e do estado das amostras aquando da injeção. Os resultados relativos às amostras de material calcário deste meio poroso encontram-se no quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso C

Calcário								
Meio Poroso C								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	1642	1642	1874	1720 (dp=18,4)	2057	1988	1832	1959 (dp=11,8)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,18	0,16	0,17	0,17	0,23	0,14	0,15	0,18

Analisando inicialmente os resultados relativos ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, verificou-se a existência de diferentes tendências da sua variação ao longo da altura das amostras nos casos seco e pré-molhado. No caso seco, evidenciou-se uma tendência de aumento da velocidade de ultra-sons da base para o topo, isto é, verificou-se a existência de um gradiente positivo da velocidade de ultra-sons ao longo da altura da amostra. Por sua vez, a amostra sujeita a molhagem antes da injeção evidenciou uma tendência de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o

topo, ou seja, verificou-se nessa amostra a existência de um gradiente negativo da velocidade de ultra-sons ao longo da sua altura.

Em média, as amostras de calcário do meio poroso C apresentaram velocidades ultra-sônicas superiores na amostra pré-molhada relativamente ao ocorrido na amostra seca aquando da injeção.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se uma tendência de diminuição da resistência mecânica da base para o topo no caso da amostra pré-molhada, isto é, verificou-se a existência de um gradiente negativo da resistência mecânica ao longo da altura da amostra pré-molhada. Tal tendência está em consonância com os resultados das velocidades ultra-sônicas. Na amostra seca, pode dizer-se que a resistência mecânica foi sensivelmente constante ao longo da altura.

Comparando a amostra seca com a amostra pré-molhada pôde verificar-se que, globalmente, os valores de resistência mecânica registados foram superiores na amostra seca, exceptuando a fatia da base.

Relativamente à relação entre os resultados obtidos nos diferentes ensaios aos quais foram submetidas as amostras, o caso seco não apresenta uma relação clara entre a velocidade de ultra-sons e a resistência à tracção por compressão diametral das suas fatias. Como é possível verificar no quadro 3.1, na base é onde existe menor velocidade de ultra-sons e maior resistência mecânica, ao passo que, no topo, a maior velocidade de ultra-sons registada não surge associada ao maior valor de resistência mecânica. Em teoria, seria expectável um aumento da resistência mecânica das fatias ao longo da altura da amostra, assim como as maiores resistências mecânicas surgirem associadas aos maiores valores de velocidades de ultra-sons. No entanto, o estado pouco compacto apresentado pelas fatias do meio e do topo desta amostra (vd. figuras 3.11 e 3.12) parece ter afectado bastante a sua resistência mecânica.



Figura 3.11 – Face superior da fatia do meio referente ao meio poroso C seco de calcário



Figura 3.12 – Fatia do topo referente ao meio poroso C seco de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

Quanto à amostra sujeita a pré-molhagem, os valores mais elevados de velocidade ultra-sônica e resistência mecânica foram ambos registados na fatia da base. Na fatia do meio embora a velocidade de ultra-sons seja superior à registada na fatia do topo, a resistência mecânica é inferior. Tal relação poderá dever-se à existência de vazios de maiores dimensões na fatia do topo relativamente ao ocorrido na fatia do meio (vd. figuras 3.13 e 3.14), que parecem ter influenciado mais significativamente a velocidade de ultra-sons do que a resistência mecânica.



Figura 3.13 - Fatia do meio referente ao meio poroso C pré-molhado de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.)



Figura 3.14 - Fatia do topo referente ao meio poroso C pré-molhado de calcário: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

Globalmente, o caso pré-molhado do meio poroso C parece evidenciar uma relação directa entre o aumento da velocidade de ultra-sons e da resistência mecânica quando comparando a fatia da base com qualquer uma das restantes.

Analisando apenas os valores médios de cada amostra verifica-se que os maiores valores de velocidades de ultra-sons estão relacionados com os maiores valores de resistência mecânica, como se pode constatar a partir do quadro 3.1. Ainda assim, a um acréscimo de cerca de 14% em termos de velocidades ultra-sónicas, a pré-molhagem da amostra deste meio poroso apenas proporcionou uma melhoria de cerca de 6% no que concerne às resistências mecânicas.

Quanto às amostras cerâmicas do meio poroso C, os resultados obtidos foram os que se apresentam no quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso C

Cerâmica								
Meio Poroso C								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	1919	1827	1521	1756 (dp=21,4)	1658	1470	1453	1527 (dp=16,5)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,41	0,21	0,11	0,24	0,38	0,21	0,13	0,24

Começando por analisar os resultados relativos ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, verificou-se que, em ambas as amostras (seca e pré-molhada), a velocidade ultra-sónica diminuiu ao longo da altura. Tal tendência pode ter resultado do estado pouco compacto em que se encontravam as fatias do meio e do topo destas amostras, como se pode observar no exemplo do caso seco presente nas figuras 3.15 e 3.16.

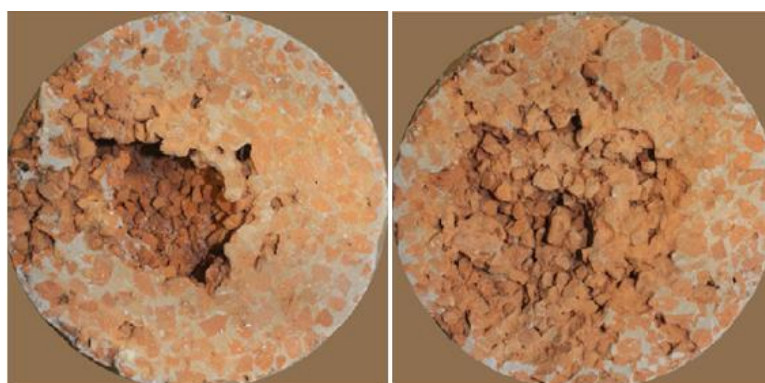


Figura 3.15 - Fatia do meio referente ao meio poroso C seco de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

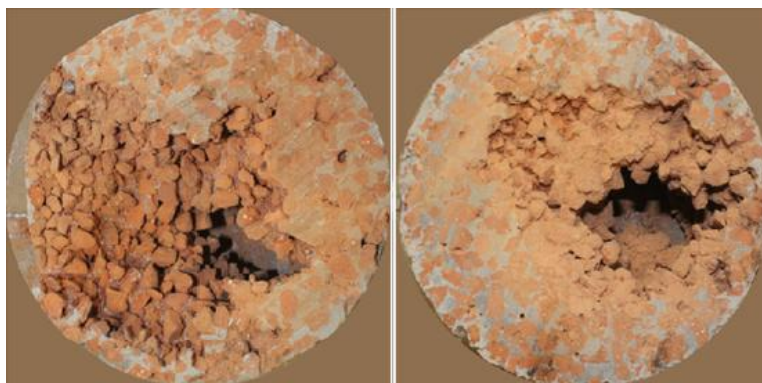


Figura 3.16 - Fatia do topo referente ao meio poroso C seco de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

Relativamente aos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção por compressão diametral registou-se uma diminuição da resistência mecânica da base para o topo em ambas as amostras (seca e pré-molhada).

Os resultados evidenciam a existência de uma relação directa entre a velocidade ultra-sónica e a resistência mecânica. Enquanto os maiores valores de ambas as grandezas foram registados nas fatias da base, os menores foram ambos registados nas fatias do topo.

Analisando apenas os valores médios de cada amostra, verifica-se que apesar de ter originado um decréscimo de cerca de 13% no que diz respeito às velocidades ultra-sónicas, a pré-molhagem não provocou alterações dignas de registo no que à resistência mecânica diz respeito.

3.4.2. Meio poroso D

Composto na sua totalidade por partículas de dimensão média (vd. quadro 1.5), o meio poroso D apresentou os resultados que se seguem. Começando pela análise das amostras de calcário, os resultados obtidos são os que se encontram no quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso D

Calcário								
Meio Poroso D								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	1931	2118	2078	2042 (dp=11,6)	2121	2086	1872	2026 (dp=10,3)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,25	0,38	0,33	0,32	0,36	0,44	0,29	0,36

Iniciando a análise pelos resultados relativos ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, verificou-se a existência de diferentes tendências da sua variação ao longo da altura das amostras

nos casos seco e pré-molhado. No caso seco, evidenciou-se uma tendência de aumento da velocidade de ultra-sons da base para o topo. Por sua vez, a amostra sujeita a molhagem antes da injeção evidenciou uma tendência de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o topo.

Em média, as amostras de calcário do meio poroso D apresentaram velocidades ultra-sônicas superiores na amostra seca relativamente ao ocorrido na amostra pré-molhada sendo, no entanto, esta diferença muito reduzida e não permitindo tirar grandes ilações.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se uma tendência de aumento da resistência mecânica da base para o topo no caso da amostra seca aquando da injeção. Na amostra pré-molhada, pode dizer-se que a tendência evidenciada foi a oposta relativamente ao verificado no caso seco, isto é, verificou-se a existência de um gradiente negativo da resistência mecânica ao longo da altura da amostra quando comparando as fatias da base e do topo.

Através da comparação dos resultados obtidos na amostra seca com os correspondentes na amostra pré-molhada pode verificar-se que, globalmente, os valores de resistência mecânica registados foram superiores na amostra pré-molhada.

No que respeita à relação entre os resultados obtidos nos diferentes ensaios aos quais foram submetidas as amostras, o caso seco apresenta uma tendência de aumento da resistência mecânica das fatias de acordo com variação da velocidade de ultra-sons. Na fatia do meio foi onde se registaram os maiores valores de velocidade de ultra-sons e resistência mecânica. Nas restantes fatias registou-se uma correspondência entre a segunda maior velocidade ultra-sónica média e também o segundo maior valor médio de resistência mecânica, bem como entre os menores valores de velocidade ultra-sónica e de resistência mecânica.

Quanto à amostra pré-molhada, o maior valor de resistência mecânica registado diz igualmente respeito à fatia do meio. A diferença do caso pré-molhado relativamente ao seco é que na amostra sujeita a pré-molhagem a menor resistência mecânica registada ocorreu na fatia do topo enquanto no caso seco ocorreu na fatia da base. Embora as velocidades de ultra-sons registadas na amostra pré-molhada variem de forma clara segundo um gradiente negativo ao longo da altura, as resistências mecânicas aparentam estar relacionadas com algo mais do que apenas com a compacidade e densidade do meio.

Ao comparar a amostra seca com a amostra pré-molhada verifica-se que, globalmente, as velocidades de ultra-sons foram superiores no caso seco. Em termos de resistências mecânicas os maiores valores registados, de um modo geral, foram obtidos na amostra pré-molhada.

O valor máximo de resistência mecânica registou-se na amostra sujeita a pré-molhagem, sendo que, tanto no caso seco como no caso pré-molhado, o valor mais elevado de resistência mecânica foi registado na fatia do meio.

Por fim, analisando apenas os valores médios de cada amostra verifica-se que a um decréscimo de cerca de 1% em termos de velocidades de ultra-sons, a pré-molhagem da amostra

proporcionou uma melhoria de cerca de 13% no que diz respeito à resistência mecânica. Pode dizer-se que, em termos globais, a resistência mecânica melhorou bastante com a pré-molhagem do meio poroso.

Quanto às amostras cerâmicas do meio poroso D, os resultados obtidos foram os que se apresentam no quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso D

Cerâmica								
Meio Poroso D								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	1868	1906	1948	1908 (dp=9,3)	1986	1977	2026	1996 (dp=10,0)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,47	0,56	0,58	0,54	0,54	0,52	0,54	0,53

Como é possível verificar, existe uma tendência global de aumento (pouco acentuado) da velocidade de ultra-sons da base para o topo em ambas as amostras.

Globalmente, as amostras cerâmicas do meio poroso D apresentaram velocidades ultra-sónicas superiores na amostra pré-molhada relativamente ao ocorrido na amostra seca.

Relativamente ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, é possível verificar a existência de uma tendência de aumento da resistência mecânica da base para o topo na amostra que se encontrava seca aquando da injeção. No caso da amostra pré-molhada, a resistência mecânica foi sensivelmente constante ao longo da altura. Importa referir que, neste caso particular, a injeção foi praticamente homogénea ao longo de toda a amostra. Como se pode verificar no quadro 3.4, os valores de velocidade ultra-sónica e resistência mecânica foram praticamente constantes ao longo da altura da amostra. Esta homogeneidade de resultados nos ensaios é, de resto, sublinhada pelo aspecto das faces das fatias estudadas que, como se pode observar nas figuras 3.17, 3.18 e 3.19, não apresentaram grandes diferenças entre si.

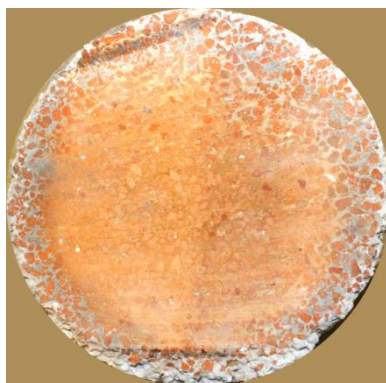


Figura 3.17 - Face superior da fatia da base referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico

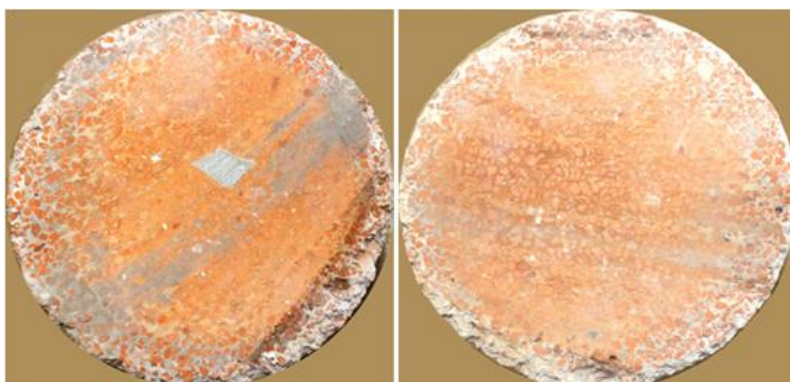


Figura 3.18 - Fatia do meio referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

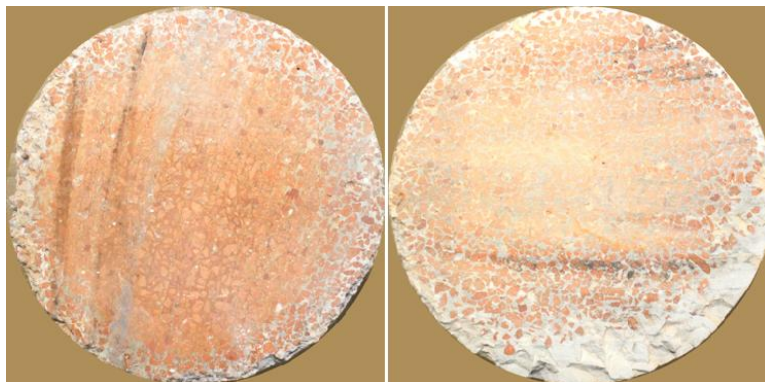


Figura 3.19 - Fatia do topo referente ao meio poroso D pré-molhado de material cerâmico: face inferior (esq.) e face superior (dir.)

Analisando apenas os valores médios de cada amostra, verificou-se que a um acréscimo de 5% em termos de velocidades ultra-sônicas a pré-molhagem da amostra cerâmica deste meio poroso originou um decréscimo de cerca de 2% no que diz respeito à resistência mecânica.

3.4.3. Meio Poroso E

Composto por 50% de partículas de dimensão média e 50% de partículas grossas, o meio poroso E apresentou os resultados que se seguem. Começando pela análise das amostras de calcário, os resultados obtidos são os que se encontram no quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras de calcário do meio poroso E

Calcário								
Meio Poroso E								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	2399	2391	2313	2367 (dp=8,7)	2336	2334	2105	2258 (dp=9,8)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,43	0,63	0,67	0,57	0,51	0,50	0,38	0,46

Começando pela análise dos resultados relativos ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, verificou-se a existência de uma tendência de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o topo em ambas as amostras, sendo esta variação muito pouco significativa no caso da amostra seca. Globalmente, as amostras de calcário do meio poroso E apresentaram velocidades ultra-sónicas superiores na amostra seca relativamente ao ocorrido na amostra pré-molhada.

Quanto aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se uma tendência de aumento da resistência mecânica da base para o topo no caso da amostra seca aquando da injeção.

Na amostra pré-molhada, pode dizer-se que os resultados denotam a existência de uma tendência clara de diminuição da velocidade ultra-sónica, bem como da resistência mecânica, das fatias da amostra ao longo da sua altura. Na fatia da base foi onde se registaram os maiores valores de velocidade ultra-sónica e resistência mecânica. Na fatia do topo foi, por sua vez, onde se registaram os valores mais reduzidos de velocidade ultra-sónica e resistência mecânica. Pode dizer-se que a amostra de calcário do meio poroso E sujeita a pré-molhagem apresentou uma relação muito consistente e directa entre os resultados obtidos nos ensaios de velocidade ultra-sónica e de tracção por compressão diametral.

Em suma e analisando apenas os valores médios de cada uma das amostras, é possível verificar que a um decréscimo de aproximadamente 5% em termos de velocidade ultra-sónica, a pré-molhagem da amostra originou uma diminuição de cerca de 19% no que à resistência mecânica diz respeito. Esta quebra no valor da resistência mecânica da amostra leva a crer que a pré-molhagem só poderá acrescentar qualidade à injeção nos casos de meios porosos com partículas finas na sua composição. Nos restantes casos, esta aparenta apenas contribuir para a instabilização da mistura de *grout* e, consequentemente, para a ocorrência de fenómenos de segregação [17].

Quanto às amostras cerâmicas do meio poroso E, os resultados obtidos encontram-se no quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Resultados dos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons e de resistência à tracção por compressão diametral nas amostras cerâmicas do meio poroso E

Cerâmica								
Meio Poroso E								
Grandeza	Amostra seca				Amostra pré-molhada			
	Localização da fatia			Média	Localização da fatia			Média
	Base	Meio	Topo		Base	Meio	Topo	
Velocidade de ultra-sons (m/s)	1845	1940	1876	1887 (dp=10,4)	2123	2096	2061	2093 (dp=10,9)
Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]	0,54	0,61	0,72	0,62	0,62	0,62	0,56	0,60

Começando por analisar os resultados dos ensaios na amostra seca, verifica-se que esta apresentou um gradiente positivo de variação ao longo da altura quer da velocidade ultra-sónica, quer da resistência mecânica. No entanto, esta variação apenas foi verdadeiramente significativa no que concerne à resistência mecânica, uma vez que a variação da velocidade ultra-sónica ao longo da altura nesta amostra foi muito reduzida.

Relativamente aos resultados obtidos na amostra pré-molhada, verifica-se que existe, para ambas as grandezas, um gradiente negativo da sua variação ao longo da altura da amostra. Constata-se igualmente a relação directa entre a velocidade ultra-sónica e a resistência mecânica das fatias. Na fatia da base foi onde se registaram os maiores valores de velocidade ultra-sónica e resistência mecânica, ao passo que ao menor valor de velocidade ultra-sónica registado surge associado o menor valor de resistência mecânica, ambos na fatia do topo.

Finalmente, analisando apenas os valores médios de cada amostra, pode dizer-se que apesar de ter originado um acréscimo de, aproximadamente, 11% em termos de velocidades ultra-sónicas, a pré-molhagem da amostra provocou um decréscimo de 3% no que respeita à resistência mecânica das fatias da amostra.

3.5. Resultados em amostras obtidas a partir de outro método de injeção

Paralelamente aos trabalhos já abordados para ambos os materiais, estudou-se uma variante do método de injeção apresentado em 1.4. Esta diferente metodologia, desenvolvida por Jorne [20], consistiu na introdução de uma camada descontínua de material calcário com 3 cm de altura sob a base dos meios porosos a injectar. O esquema ilustrativo do processo de injeção utilizado neste ponto encontra-se na figura 3.20.

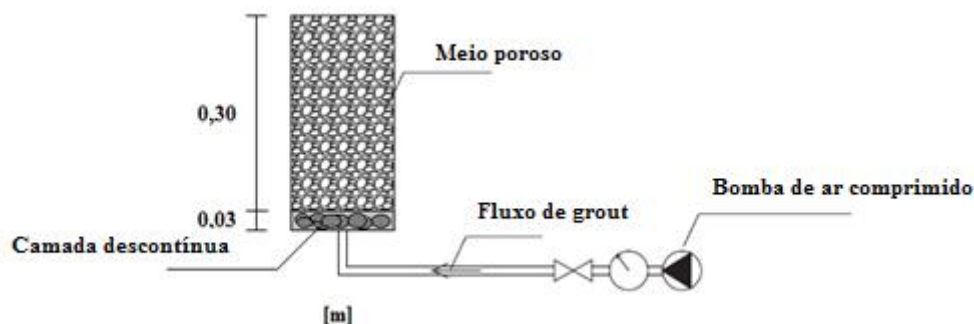


Figura 3.20 – Método de injeção com utilização de camada descontínua

A partir desta diferente metodologia de injeção foi obtida uma série de amostras cerâmicas respeitantes aos meios porosos estudados anteriormente. O objectivo do estudo desta série de amostras foi verificar se esta metodologia alternativa constituía uma solução para evitar o adensamento de partículas do meio poroso junto ao local de entrada da injeção que tinha sido verificado segundo o método de injeção anteriormente utilizado, e que provocou problemas de perturbação e obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout* nesta zona. Foram então comparados os resultados obtidos com os resultados relativos à metodologia de injeção anteriormente adoptada.

Começando pelos valores médios de velocidade ultra-sónica registados em cada meio poroso, os resultados respeitantes às amostras secas obtidas segundos os dois métodos de injeção encontram-se no quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Velocidades de ultra-sons registadas nas amostras cerâmicas secas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção

Meio poroso	Velocidade de ultra-sons (m/s)							
	Injecção com camada descontínua				Injecção sem camada descontínua			
	Base	Meio	Topo	Média	Base	Meio	Topo	Média
C	1897	1866	1818	1860 (dp=22,2)	1919	1827	1521	1756 (dp=21,4)
D	2381	2428	2418	2409 (dp=10,2)	1868	1906	1948	1908 (dp=9,3)
E	2270	2213	2185	2223 (dp=12,5)	1845	1940	1876	1887 (dp=10,4)
Média da zona	2183	2169	2140	-	1877	1891	1782	-

Como é possível verificar, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras obtidas por injeção com utilização de uma camada descontínua foram globalmente superiores às registadas nas amostras injectadas sem a utilização de camada descontínua. Com a utilização da camada descontínua sob a base das amostras foi possível reduzir a tendência de adensamento ou de maior compacidade junto ao local de injeção, especialmente nas amostras respeitantes a meios porosos com partículas finas na sua composição. Desta forma, os problemas de perturbação e obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout* nesta zona foram minimizados. Quanto à variação ao longo da altura da

velocidade ultra-sónica, apenas a amostra do meio poroso C injectada sem a utilização da camada descontínua apresentou uma variação mais significativa, apresentando um gradiente negativo ao longo da altura.

Relativamente às amostras pré-molhadas, encontram-se no quadro 3.8 os valores médios de velocidade ultra-sónica obtidos em cada meio poroso segundo os diferentes métodos de injeção.

Quadro 3.8 - Velocidades de ultra-sons registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção

Velocidade de ultra-sons (m/s)								
Meio poroso	Injecção com camada descontínua				Injecção sem camada descontínua			
	Base	Meio	Topo	Média	Base	Meio	Topo	Média
C	2142	2080	2027	2083 (dp=15,8)	1658	1470	1453	1527 (dp=16,5)
D	2210	2282	2251	2247 (dp=9,7)	1986	1977	2026	1996 (dp=10,0)
E	2368	2435	2355	2386 (dp=10,6)	2123	2096	2061	2093 (dp=10,9)
Média da zona	2240	2266	2211	-	1922	1847	1847	-

Tal como no caso seco, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras obtidas por injeção com utilização de camada descontínua foram globalmente superiores às registadas nas amostras obtidas através de injeção sem a utilização de camada descontínua.

Quanto à variação ao longo da altura da velocidade ultra-sónica, novamente apenas a amostra do meio poroso C injectada sem camada descontínua apresentou uma variação significativa e negativa ao longo da altura.

Relativamente às resistências mecânicas, os valores registados nas amostras secas de cada meio poroso, obtidas a partir dos diferentes métodos de injeção, encontram-se no quadro 3.9.

Quadro 3.9 - Resistências à tracção por compressão diametral registadas nas amostras cerâmicas secas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção

Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]								
Meio poroso	Injecção com camada descontínua				Injecção sem camada descontínua			
	Base	Meio	Topo	Média	Base	Meio	Topo	Média
C	0,27	0,21	0,22	0,24	0,41	0,21	0,11	0,24
D	0,91	0,81	0,68	0,80	0,47	0,56	0,58	0,54
E	1,01	0,45	0,53	0,66	0,54	0,61	0,72	0,62
Média da zona	0,73	0,49	0,48	-	0,47	0,46	0,47	-

Verifica-se, globalmente, a existência de maiores valores de resistência mecânica nas amostras obtidas por injeção com utilização de camada descontínua. O único caso em que a utilização da

camada descontínua não parece ter originado grande efeito, em termos de valor médio de resistência mecânica das amostras, foi no meio poroso C. No entanto, é possível verificar que a variação da resistência mecânica ao longo da altura na amostra injectada com utilização de camada descontínua foi inferior à evidenciada pela amostra obtida por injeção sem utilização de camada descontínua. Pode dizer-se que, no caso específico do meio poroso C seco, a utilização de camada descontínua no processo de injeção originou melhorias essencialmente do ponto de vista da homogeneidade da resistência mecânica das amostras ao longo da altura.

Nos meios porosos D e E observou-se que a utilização de camada descontínua no processo de injeção originou a inversão do gradiente de resistência mecânica ao longo da altura.

Quanto aos valores de resistência à tracção por compressão diametral registados no caso das amostras obtidas segundo os dois métodos de injeção e sujeitas a pré-molhagem, os resultados são os que se apresentam no quadro 3.10.

Quadro 3.10 - Resistências à tracção por compressão diametral registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas obtidas a partir dos dois métodos distintos de injeção

Meio poroso	Resistência à tracção por compressão diametral [MPa]							
	Injecção com camada descontínua				Injecção sem camada descontínua			
	Base	Meio	Topo	Média	Base	Meio	Topo	Média
C	0,23	0,19	0,17	0,20	0,38	0,21	0,13	0,24
D	0,86	1,27	1,18	1,10	0,54	0,52	0,54	0,53
E	0,91	0,91	0,61	0,81	0,62	0,62	0,56	0,60
Média da zona	0,67	0,79	0,65	-	0,51	0,45	0,41	-

Tal como no caso seco, verifica-se que globalmente as resistências mecânicas das amostras obtidas por injeção com utilização de camada descontínua foram superiores aos valores obtidos nas amostras injectadas sem utilização de camada descontínua. O meio poroso C, no entanto, apresentou maiores valores de resistência mecânica para a amostra injectada sem utilização de camada descontínua. Mais uma vez, no meio poroso C a utilização da camada descontínua no processo de injeção parece apenas ter contribuído para uma melhoria do ponto de vista da homogeneidade da resistência mecânica das amostras ao longo da altura.

Quanto ao meio poroso D, evidenciou-se a existência de um gradiente positivo de variação da resistência mecânica ao longo da altura na amostra injectada com recurso a camada descontínua, ao passo que na amostra injectada sem utilização de camada descontínua o valor da resistência mecânica foi praticamente constante ao longo da altura.

Por sua vez, no meio poroso E as resistências mecânicas apresentaram, para ambos os métodos de injeção, uma variação negativa ao longo da altura das amostras.

De notar que, no caso das amostras pré-molhadas as variações decorrentes da utilização de camada descontínua na injeção, ao nível da resistência mecânica das amostras, foram mais significativas do que nas amostras secas. Esta diferença deveu-se, fundamentalmente, à maior tendência de adensamento das amostras pré-molhadas junto à zona de injeção, que conduzia a um aumento da perturbação e obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout* nessa zona.

3.6. Notas sobre a utilização do ensaio de velocidade de propagação de ultrassons

Após a análise separada dos resultados dos ensaios efectuados nas amostras dos diferentes materiais, foi possível retirar ilações bastante interessantes.

Em termos de velocidades ultra-sónicas, verificou-se uma tendência do seu aumento ao longo da altura das amostras que se encontravam secas aquando da injeção. Apenas na amostra cerâmica seca respeitante ao meio poroso C se verificou uma diminuição significativa das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura. Esta tendência particular desta amostra parece ter-se devido à existência de bloqueios do meio poroso à passagem do *grout*, que resultou no aspecto pouco compacto evidenciado pelas fatias do meio e do topo nesta amostra, como se pode observar nas figuras 3.15 e 3.16.

Quanto às amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se globalmente uma tendência de diminuição das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura das amostras em ambos os materiais.

Comparando os valores de velocidades ultra-sónicas obtidas nas amostras pré-molhadas dos três meios porosos ensaiados em ambos os materiais, pôde concluir-se que as maiores velocidades foram registadas no meio poroso E, seguido dos meios D e C, respectivamente. No caso das amostras de material calcário, a ordem de velocidades ultra-sónicas entre os três meios porosos referida foi igualmente válida para as amostras secas aquando da injeção. Apenas no caso das amostras cerâmicas secas se verificou o registo de maiores velocidades ultra-sónicas no meio poroso D, seguido dos meios porosos E e C, respectivamente. Como seria expectável, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras do meio poroso C foram, para ambos os materiais e para ambos os estados (seco e molhado) das amostras aquando da injeção, mais baixas do que nos meios porosos D e E. A presença de partículas finas na sua composição originou uma maior dificuldade de penetração do *grout* nas amostras do meio poroso C e conduziu a que as suas amostras apresentassem, após a injeção, um volume de vazios superior ao ocorrido nos restantes casos e, consequentemente, menores velocidades ultra-sónicas.

Verificou-se também que, a pré-molhagem das amostras influenciou de forma distinta as velocidades ultra-sónicas registadas nos meios porosos dos dois materiais. Nas amostras de calcário, os meios porosos D e E apresentaram maiores valores de velocidade ultra-sónica no caso das amostras que se encontravam secas aquando da injeção. Por sua vez, as amostras cerâmicas destes meios

apresentaram maiores valores de velocidades ultra-sónicas no caso das amostras sujeitas a pré-molhagem.

Quanto ao meio poroso C, o efeito da pré-molhagem foi igualmente distinto nos dois materiais. Enquanto nas amostras de calcário a pré-molhagem permitiu a obtenção de maiores valores de velocidades ultra-sónicas, nas amostras cerâmicas a pré-molhagem traduziu-se numa diminuição dos valores de velocidade ultra-sónica registados.

Comparando os valores das velocidades ultra-sónicas registadas nos dois materiais, verificou-se que, globalmente, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras de calcário foram superiores às registadas nas amostras cerâmicas. O único caso em que tal não sucedeu foi nas amostras secas do meio poroso C, onde as velocidades registadas nos dois materiais foram muito similares, tendo-se verificado maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário para todos os outros casos.

Relativamente à resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se que todos os valores registados nas amostras cerâmicas foram superiores aos registados nas amostras correspondentes de calcário.

Em ambos os materiais, a tendência evidenciada pelas amostras secas aquando da injeção dos meios porosos D e E foi de um aumento da resistência mecânica ao longo da altura. No meio poroso C, verificou-se uma diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura, principalmente na amostra cerâmica seca.

Quanto às amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se uma tendência de diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura nas amostras de ambos os materiais e em todos os meios porosos.

Verificou-se também que os maiores valores de resistência à tracção por compressão diametral foram registados nas amostras do meio poroso E, seguido dos meios porosos D e C, respectivamente. Esta hierarquia de resistências à tracção por compressão diametral nos diferentes meios porosos foi evidenciada quer no caso seco, quer no caso de pré-molhagem das amostras.

Fazendo um balanço final, é muito interessante constatar que, apesar de as velocidades ultra-sónicas registadas terem sido superiores nas amostras de calcário, as resistências à tracção por compressão diametral foram superiores nas amostras cerâmicas. Pode então inferir-se que, mais importante do que as massas volúmicas e resistências mecânicas de cada um dos diferentes materiais, o factor determinante para a resistência à tracção por compressão diametral de um meio poroso injectado por *grout* é a qualidade das ligações que este estabelece com as partículas do meio.

4. TOMOGRAFIA ULTRA-SÓNICA

Através do processamento das velocidades ultra-sónicas registadas num dado corpo segundo um modelo tridimensional, é possível a obtenção de mapas detalhados da distribuição dessas velocidades numa determinada secção plana do corpo [8, 16, 25, 28]. Estes “mapas” são designados por tomogramas e fornecem informações sobre o estado do interior dos corpos em estudo. Consoante as escalas utilizadas, as referidas imagens permitem perceber a localização das zonas mais compactas (associadas às maiores velocidades ultra-sónicas) e menos compactas (associadas às menores velocidades ultra-sónicas) do corpo em estudo.

Comparativamente à utilização de ondas de baixa frequência, as ondas ultra-sónicas apresentam comprimentos inferiores que lhes permitem aferir com maior precisão o estado do interior das alvenarias (vd. 2.3) [31].

4.1. Procedimento

Após a secagem das amostras numa estufa a uma temperatura de $60\pm5^{\circ}\text{C}$ e o seu posterior arrefecimento até à temperatura ambiente [18], procedeu-se à realização do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons. Este foi conduzido da mesma forma que em 2.6 e 3.1, tendo o sinal emitido sido de valor constante e igual a 500V.

Nesta fase, as velocidades ultra-sónicas utilizadas para a obtenção de tomogramas foram obtidas com recurso a uma malha de pontos distinta das referidas anteriormente (vd. 2.6 e 3.1.), tendo sido a sua metodologia igualmente desenvolvida por Jorne [20]. Como ilustrado na figura 4.1, utilizou-se neste caso uma malha constituída por seis pontos em cada uma das quatro linhas longitudinais às amostras e perpendiculares com os topos, distando os pontos de cada linha da malha 4cm entre si e distando o ponto inferior igualmente 4cm relativamente à base das amostras. Esta malha permitiu a obtenção de informações relativas a mais trajectórias do que a malha de três pontos (vd. figura 2.5) e, como tal, contribuiu para uma avaliação mais detalhada da constituição do interior das amostras. Nesta fase, foram submetidas aos ensaios de velocidade de propagação de ultra-sons tanto as amostras de calcário como as amostras cerâmicas anteriormente analisadas em 3. De referir que, as medições das velocidades ultra-sónicas utilizadas na obtenção de tomogramas foram realizadas a montante do estudo efectuado em 3, uma vez que esse pressupunha o corte das amostras e impossibilitava a realização das medições dos tempos de propagação das ondas ultra-sónicas entre pontos localizados em diferentes fatias de cada amostra.

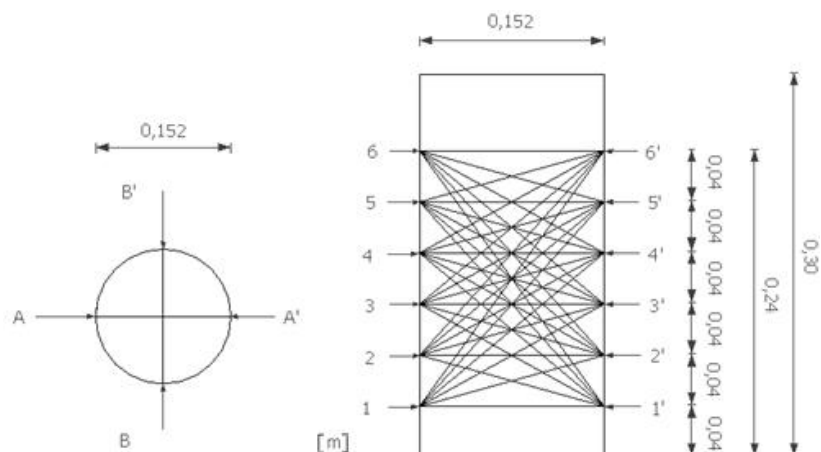


Figura 4.1 - Malha de 6 pontos: vistas de topo (esq.) e segundo os cortes A-A' e B-B' (dir.)

4.2. Software

O processamento das velocidades ultra-sônicas registadas nas amostras com vista à obtenção de tomogramas foi efectuado com recurso ao programa 3DTOM. Inicialmente, este pressupõe a definição do modelo tridimensional a utilizar através do separador *Model – Generate*, apresentado na figura 4.2.

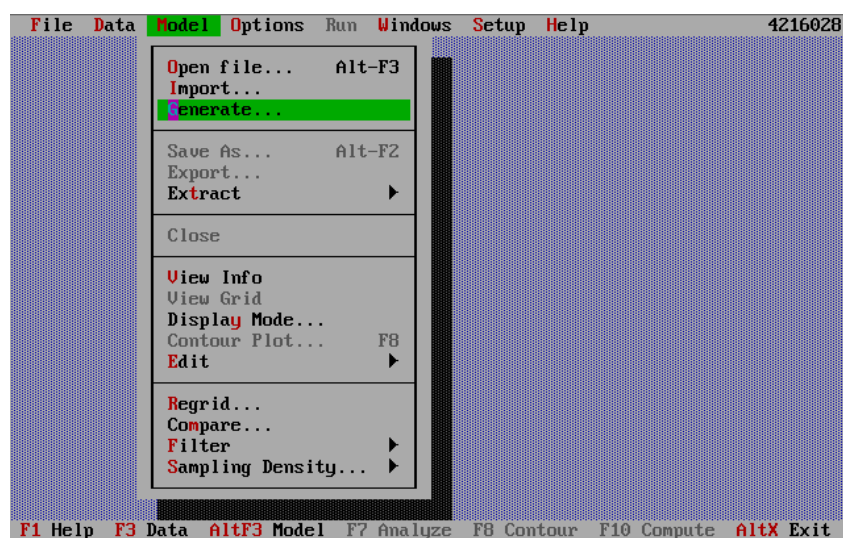


Figura 4.2 – 3DTOM: separador *Model*

Em seguida, deve ser escolhido o tipo de modelo tridimensional a utilizar. No presente trabalho, o modelo escolhido foi do tipo *Checkerboard* como ilustrado na figura 4.3. Este modelo consiste na utilização de uma grelha quadriculada de pontos, cujo número e posicionamento pode ser ajustado de acordo com as preferências do utilizador.

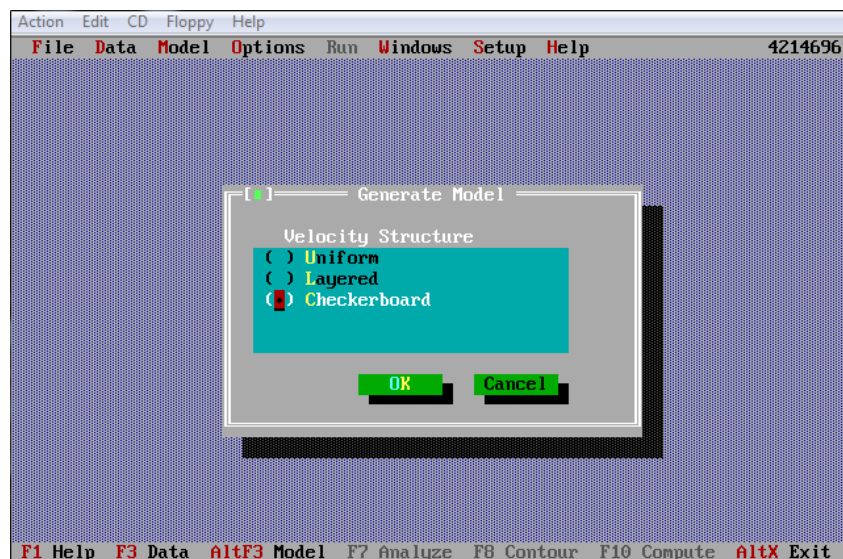


Figura 4.3 – 3DTOM: escolha do modelo adoptado

Para a definição do posicionamento da grelha de pontos é necessário definir previamente o sistema de coordenadas utilizado e o seu posicionamento. Neste trabalho, o sistema de coordenadas adoptado foi o que se encontra ilustrado na figura 4.4.

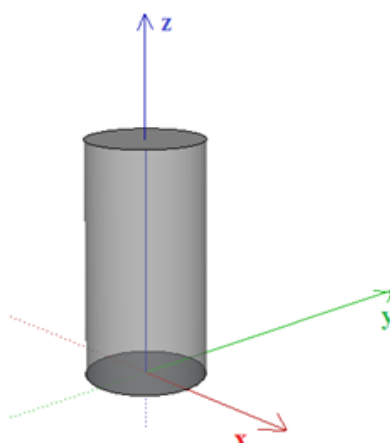


Figura 4.4 – Sistema de coordenadas adoptado

Como se pode observar, a origem de todos os eixos de coordenadas utilizados para o posicionamento dos pontos da grelha do modelo tridimensional definiu-se como sendo situada no centro da base das amostras. Desta forma, possuindo as amostras um diâmetro de 0,152m, a zona onde interessava conhecer a distribuição de velocidades localizava-se entre -0,076m e 0,076m, no que respeita ao posicionamento adoptado dos eixos x e y. Quanto ao eixo z, apenas até 0,24m da base foram realizadas medições na malha utilizada para o ensaio de ultra-sons, de modo que os valores dessa coordenada definiram-se como variando entre 0 e 0,24m.

Após a escolha do modelo ilustrado na figura 4.3, definiu-se então um modelo tridimensional constituído por dez pontos em cada um dos eixos, como ilustrado na figura 4.5, sendo as restrições adoptadas para as coordenadas de acordo com o referido no parágrafo anterior.

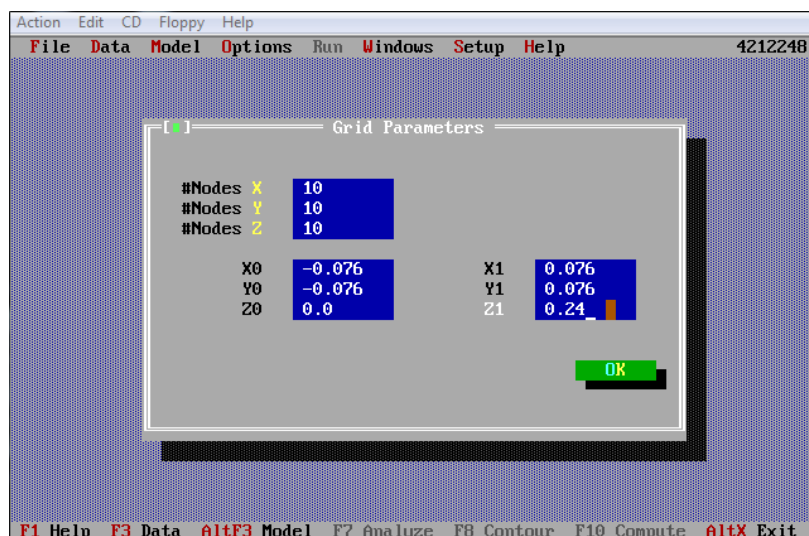


Figura 4.5 – 3DTOM: *Grid Parameters*

Após inserir todos os dados relativos à localização da grelha do modelo tridimensional, foram inseridos os valores máximos e mínimos e velocidade ultra-sónica registados em cada uma das amostras. Finalizada a definição do modelo, este foi guardado com o formato “.3DM”.

Em seguida, definiram-se as unidades utilizadas para processamento de dados através do separador *Options – Units – Define*, como ilustrado na figura 4.6. No presente trabalho, as unidades utilizadas foram metro (comprimento) e segundo (tempo). Finalizada a definição das unidades utilizadas, estas foram guardadas num ficheiro com o formato “.3DO”.

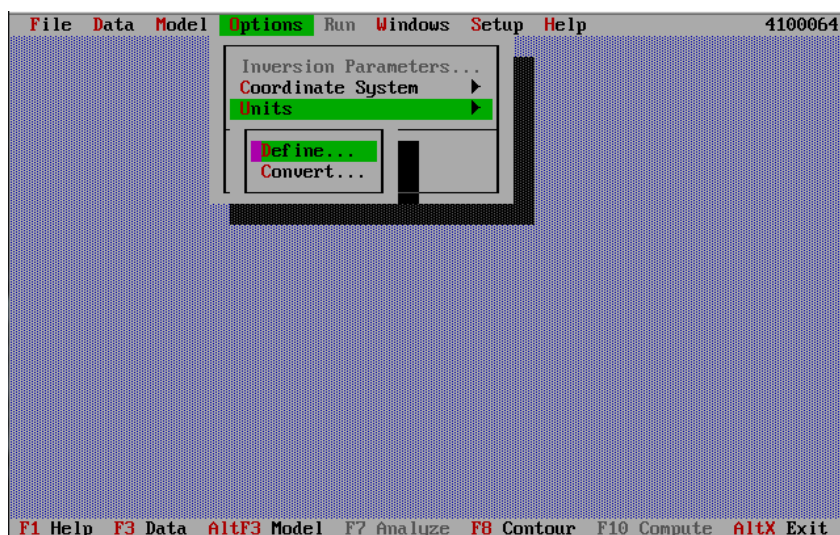
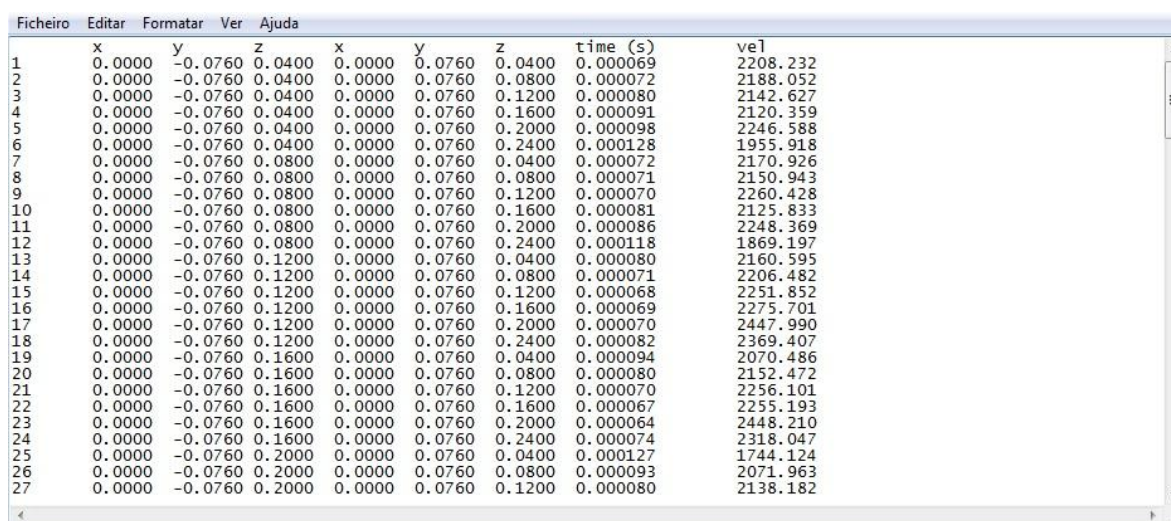


Figura 4.6 – 3DTOM: definição de unidades

Para todas as amostras, os ficheiros respeitantes ao modelo e às unidades a utilizar foram carregados no *software* antes da abertura dos ficheiros respeitantes aos dados exclusivos de cada uma das amostras no sentido de garantir que o modelo e as unidades utilizadas fossem iguais para todos os casos.

Para cada amostra, o *software* pressupõe a utilização de ficheiros do tipo “.3DD” contendo as informações relativas a todas as medições efectuadas. Estes ficheiros obtiveram-se através da aplicação *Notepad* (Bloco de notas) do *Windows*, na qual foram inseridos os dados que em seguida se apresentam, referentes a todas as medições efectuadas em cada uma das amostras. Como se pode observar na figura 4.7, na primeira coluna foi atribuído um número a cada trajectória, nas seis colunas seguintes foram indicadas as coordenadas dos transdutores emissor e receptor, respectivamente, da trajectória a que cada linha correspondia e, por fim, o tempo registado (em s) e a velocidade ultrasónica (em m/s) obtida na trajectória.



	x	y	z	x	y	z	time (s)	vel
1	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.0400	0.000069	2208.232
2	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.0800	0.000072	2188.052
3	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.1200	0.000080	2142.627
4	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.1600	0.000091	2120.359
5	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.2000	0.000098	2246.588
6	0.0000	-0.0760	0.0400	0.0000	0.0760	0.2400	0.000128	1955.918
7	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.0400	0.000072	2170.926
8	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.0800	0.000071	2150.943
9	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.1200	0.000070	2260.428
10	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.1600	0.000081	2125.833
11	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.2000	0.000086	2248.369
12	0.0000	-0.0760	0.0800	0.0000	0.0760	0.2400	0.000118	1869.197
13	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.0400	0.000080	2160.595
14	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.0800	0.000071	2206.482
15	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.1200	0.000068	2251.852
16	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.1600	0.000069	2275.701
17	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.2000	0.000070	2447.990
18	0.0000	-0.0760	0.1200	0.0000	0.0760	0.2400	0.000082	2369.407
19	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.0400	0.000094	2070.486
20	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.0800	0.000080	2152.472
21	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.1200	0.000070	2256.101
22	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.1600	0.000067	2255.193
23	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.2000	0.000064	2448.210
24	0.0000	-0.0760	0.1600	0.0000	0.0760	0.2400	0.000074	2318.047
25	0.0000	-0.0760	0.2000	0.0000	0.0760	0.0400	0.000127	1744.124
26	0.0000	-0.0760	0.2000	0.0000	0.0760	0.0800	0.000093	2071.963
27	0.0000	-0.0760	0.2000	0.0000	0.0760	0.1200	0.000080	2138.182

Figura 4.7 – Exemplo de um ficheiro “.3DD” de uma das amostras

Após inseridos os dados, cada ficheiro foi devidamente identificado com a amostra a que dizia respeito e gravado com a terminação “.3DD”. Posteriormente, para o estudo de cada amostra foi aberto no *software* o respectivo ficheiro “.3DD” através do separador *Data – Open file*, como ilustrado na figura 4.8.

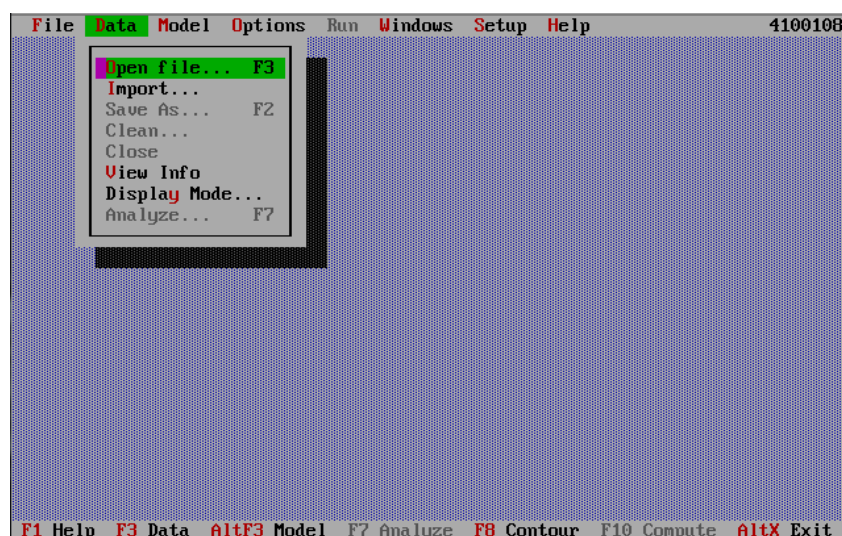


Figura 4.8 – 3DTOM: separador *Data*

Posteriormente à abertura do ficheiro de cada amostra em estudo, procedeu-se à definição das suas restrições globais de velocidades através do separador *Options – Inversion Parameters*, como ilustrado na figura 4.9.

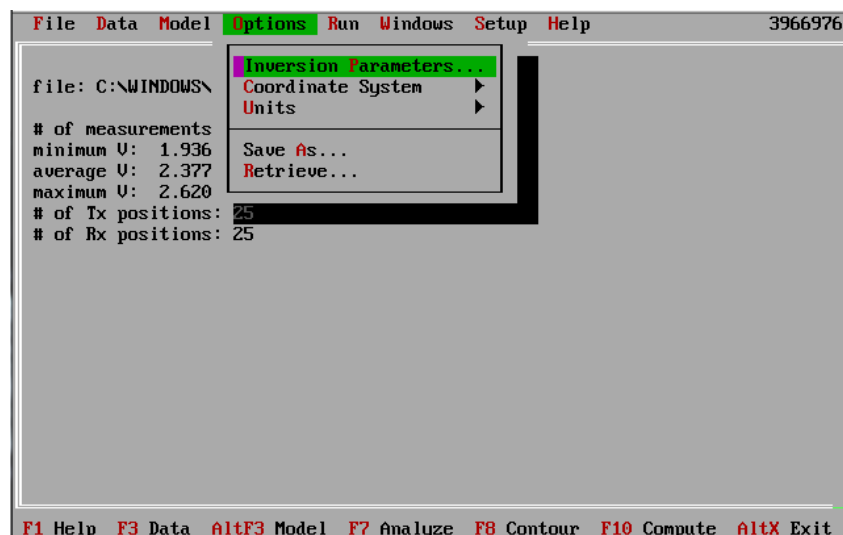


Figura 4.9 – 3DTOM: separador *Options*

Uma vez aberta a janela respeitante aos *Inversion Parameters*, os campos relativos à máxima e mínima velocidade das *Global Constraints* (restrições globais) de cada amostra foram preenchidos com os valores dos percentis 97º e 3º, respectivamente, de todas as velocidades registadas na amostra. A utilização dos valores referidos deve-se ao facto de, na realização do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons, se obterem por vezes valores que não transmitem consistentemente o verdadeiro estado das amostras. Tratando-se de meios heterogéneos nos quais os efeitos de atenuação acústica não se manifestam de forma homogénea, devem ser ignorados os valores fora do intervalo referido.

Todos os outros campos respeitantes à configuração do algoritmo de inversão foram mantidos de acordo com o que se apresentava pré-definido pelo *software*, como ilustrado na figura 4.10.

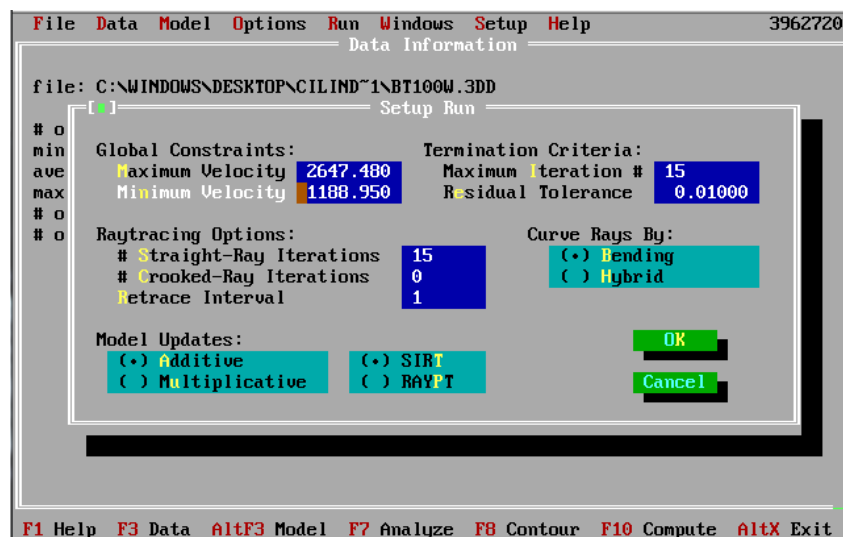


Figura 4.10 – 3DTOM: separador *Inversion Parameters*, definição das *Global Constraints*

Finalmente, através do separador *Run* fez-se correr o algoritmo iterativo do software, como se ilustra na figura 4.11.

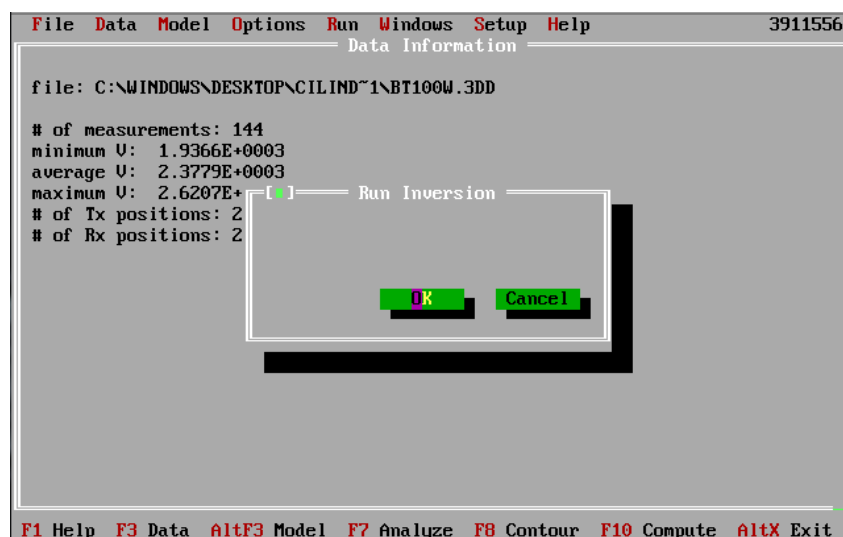


Figura 4.11 – 3DTOM: separador *Run*

Finalizado o processamento dos dados relativos a cada uma das amostras, foi então possível a obtenção dos tomogramas adequados para a análise do resultado das injeções de *grout* efectuadas nas amostras. A obtenção dessas imagens realizou-se através do separador *Contour*, como ilustrado na figura 4.12, no qual se definiram, para cada plano analisado, as velocidades mínima e máxima cuja representação se pretendia, as dimensões mínima e máxima das coordenadas do plano e o intervalo abrangido pelas diferentes gamas de velocidades ultra-sónicas nos tomogramas.

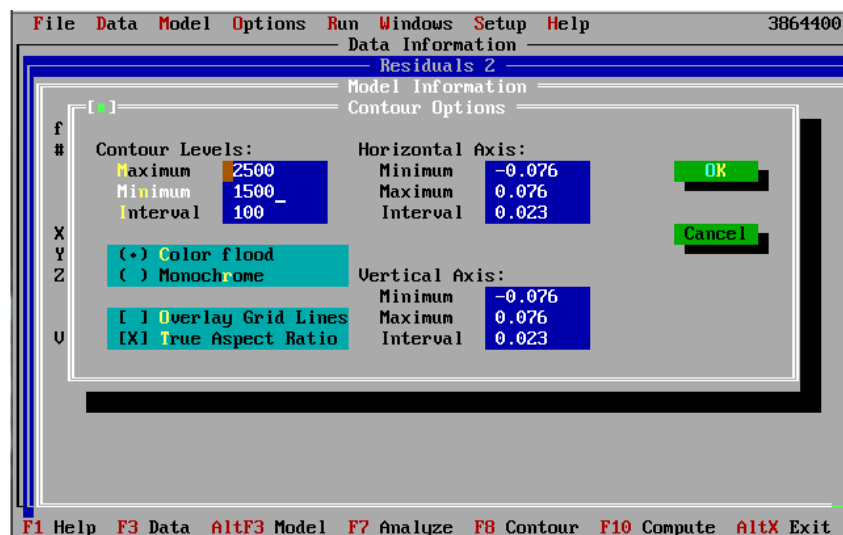


Figura 4.12 – 3DTOM: *Contour Options*

4.3. Análise e discussão dos resultados

Para uma melhor compreensão dos resultados que em seguida se apresentam, a sua exposição será efectuada de acordo com a tipologia das amostras.

4.3.1. Calcário

Começando pela análise das amostras secas de calcário, os tomogramas representativos dos três meios porosos estudados encontram-se na figura 4.13.

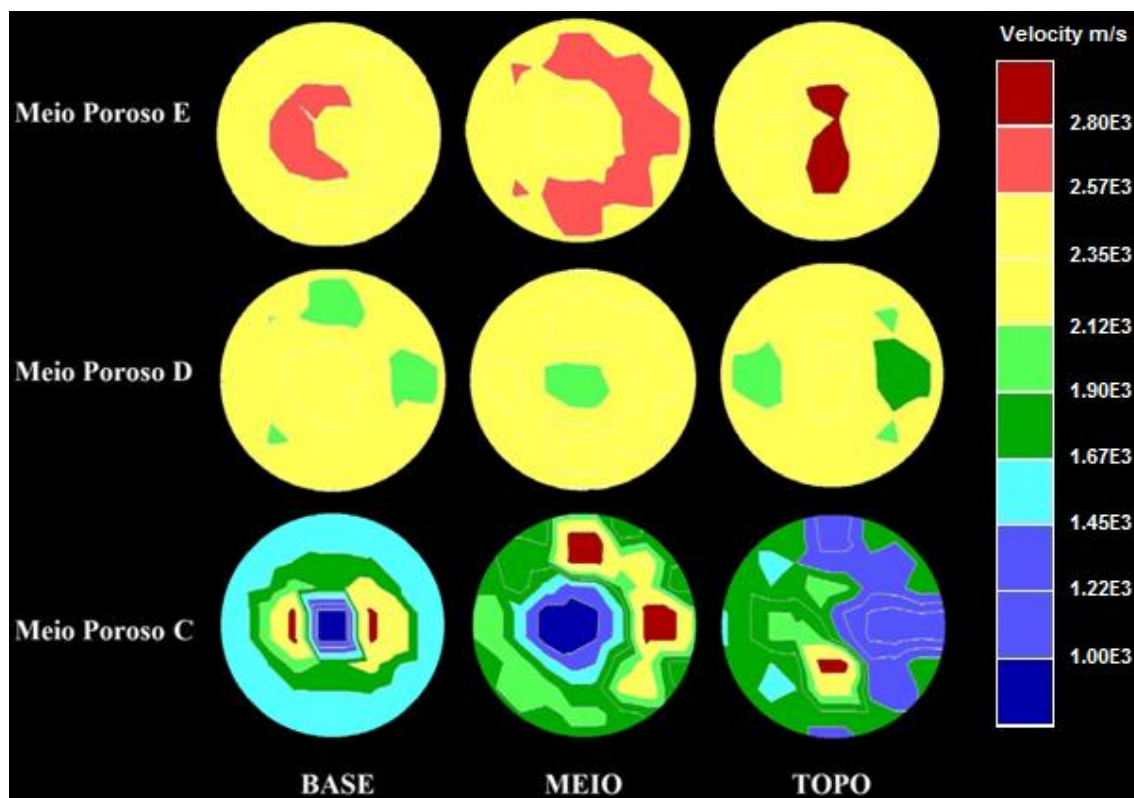


Figura 4.13 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras secas de calcário dos três meios porosos em estudo

Como é possível verificar, os tomogramas evidenciam uma tendência global de aumento da velocidade de ultra-sons da base para o topo das amostras. Tal tendência está de acordo com o já referido em 3.4, verificando-se igualmente uma variação mais significativa das velocidades ultra-sónicas em função da altura no meio poroso C.

Por sua vez, as amostras pré-molhadas permitiram a obtenção dos tomogramas apresentados na figura 4.14.

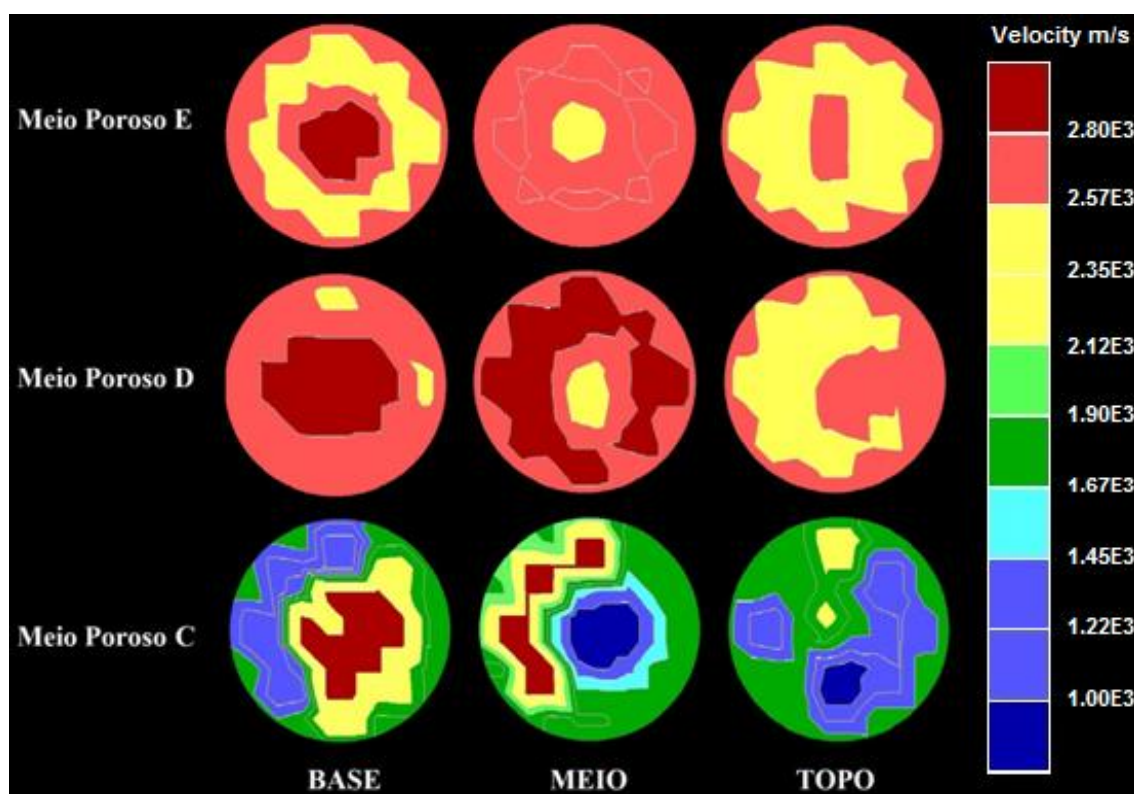


Figura 4.14 – Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras pré-molhadas de calcário dos três meios porosos em estudo

Os tomogramas relativos às amostras pré-molhadas de calcário evidenciam uma tendência global de diminuição da velocidade ultra-sónica da base para o topo das amostras. Esta evidência pode facilmente compreender-se através da análise das áreas correspondentes a velocidades ultra-sónicas superiores a 2800 m/s (representadas a *bordeaux*). No meio poroso C torna-se ainda mais evidente a referida tendência através da análise das áreas relativas a velocidades inferiores a 1000 m/s (preenchidas a azul mais escuro).

Ao comparar-se, no caso das amostras secas, os tomogramas dos diferentes meios porosos verifica-se que as maiores velocidades ultra-sónicas registadas foram obtidas no meio poroso E, seguido dos meios porosos D e C, respectivamente. No caso das amostras pré-molhadas, as maiores velocidades ultra-sónicas foram registadas nos meios porosos D e E, tendo sido no meio poroso C que se registaram os seus menores valores. Semelhantes hierarquias de velocidades ultra-sónicas já tinham,

de resto, sido verificadas em 3.4, de modo que os tomogramas corroboram as conclusões anteriormente retiradas.

4.3.1.1. Meio poroso C

Analisando, em seguida, apenas os tomogramas relativos às amostras (seca e pré-molhada) de calcário do meio poroso C, os resultados obtidos foram os que se apresentam na figura 4.15.

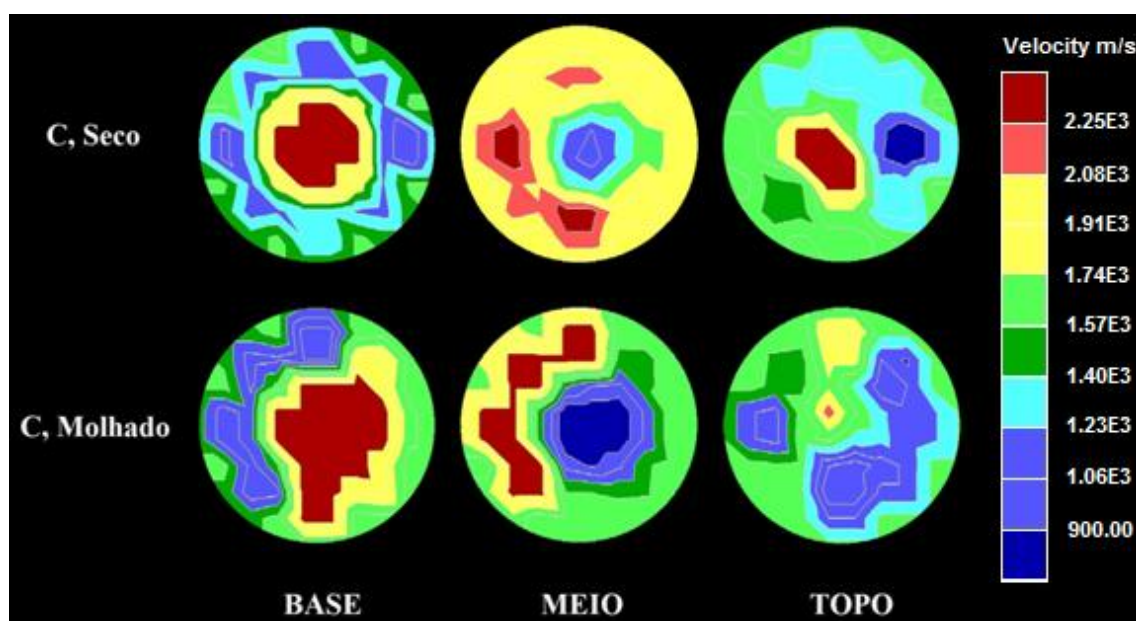


Figura 4.15 - Meio poroso C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário

A análise dos tomogramas não é completamente esclarecedora no que respeita à comparação entre as velocidades médias das amostras seca e pré-molhada, embora as áreas respeitantes às zonas onde se registaram velocidades superiores a 2250 m/s (preenchidas a *bordeaux*) pareçam maiores na amostra pré-molhada do que na seca, particularmente nas fatias da base e do meio das amostras. Por outro lado, a área a azul é maior nas fatias da amostra pré-molhada (principalmente nas fatias do meio e do topo), resultando, como visto em 3.4.1, no registo de menores resistências mecânicas nessas fatias relativamente ao ocorrido nas fatias da amostra seca. É possível verificar através dos tomogramas que a variação da velocidade de ultra-sons em função da altura das amostras, ou gradiente, é oposta nos casos seco e pré-molhado. Enquanto na amostra seca a velocidade ultra-sónica apresenta um gradiente positivo ao longo da altura, na amostra pré-molhada este gradiente é negativo.

A menor significância na variação das resistências mecânicas face à melhoria evidenciada pelas velocidades ultra-sónicas através da pré-molhagem neste meio poroso (vd. quadro 3.1) poderá dever-se ao facto de a pré-molhagem proporcionar uma melhor penetrabilidade do *grout*, diminuindo a probabilidade de ocorrência de fenómenos de filtração ou bloqueio à sua passagem. Desta forma, o *grout* consegue penetrar em mais zonas do meio poroso, dando origem a um meio de maior compacidade, proporcionando assim a obtenção de maiores valores de velocidades ultra-sónicas. No

entanto, esta melhoria não é tão acentuada no que respeita aos valores de resistência à tracção por compressão diametral. Apesar de proporcionar um melhor envolvimento das partículas do meio poroso por parte do *grout*, a pré-molhagem condiciona a coesão das ligações estabelecidas entre o *grout* e as partículas do meio poroso, nomeadamente das ligações por aderência, e não contribui assim para uma grande melhoria em termos de resistências mecânicas. Em particular, as ligações agregado-*grout* por aderência são prejudicadas devido à existência de água da pré-molhagem no interior das partículas que, conseqüentemente, minora a penetração do *grout* dentro destas.

Ajustando as restrições de velocidades e a escala de velocidades de cada amostra, separadamente, obtiveram-se tomogramas mais precisos de diversos planos das amostras, passíveis de comparação com fotografias tiradas às amostras nas faces correspondentes a esses planos.

Começando por analisar a amostra seca de calcário do meio poroso C, já tinha sido verificada na figura 4.15 a existência de um gradiente positivo da velocidade ultra-sónica ao longo da altura. No entanto, como visto em 3.4.1, o gradiente positivo de variação da velocidade ultra-sónica ao longo da altura não encontrou correspondência na variação da resistência à tracção por compressão diametral. Como foi verificado, as menores resistências mecânicas registadas nas fatias do meio e do topo desta amostra pareciam estar relacionadas com a sua menor compacidade, evidenciada pela existência de vazios de dimensões significativas.

A explicação para os resultados referidos é o facto de os vazios existentes neste meio poroso serem de pequenas dimensões e desta amostra se encontrar seca aquando da injeção, de tal forma que o *grout* foi perdendo água para o meio poroso ao longo da altura da amostra e tornou-se, conseqüentemente, menos fluido e menos capaz de penetrar os vazios. Desta forma, os vazios evidenciados pelas fatias do meio e do topo denotam precisamente a ocorrência de fenómenos de bloqueio do meio poroso à passagem do *grout*, como referido em 3.3 (vd. figura 3.9).

Ora, através da análise das figuras 4.16, 4.17 e 4.18, é possível verificar não apenas a existência dos vazios referidos, como também a sua identificação nos tomogramas através do preenchimento dessas zonas pelas cores correspondentes às menores velocidades ultra-sónicas registadas na amostra. Os tomogramas sugerem uma elevada fiabilidade deste método não destrutivo de avaliação e diagnóstico da morfologia interna de alvenarias quando injectadas por *grout*.

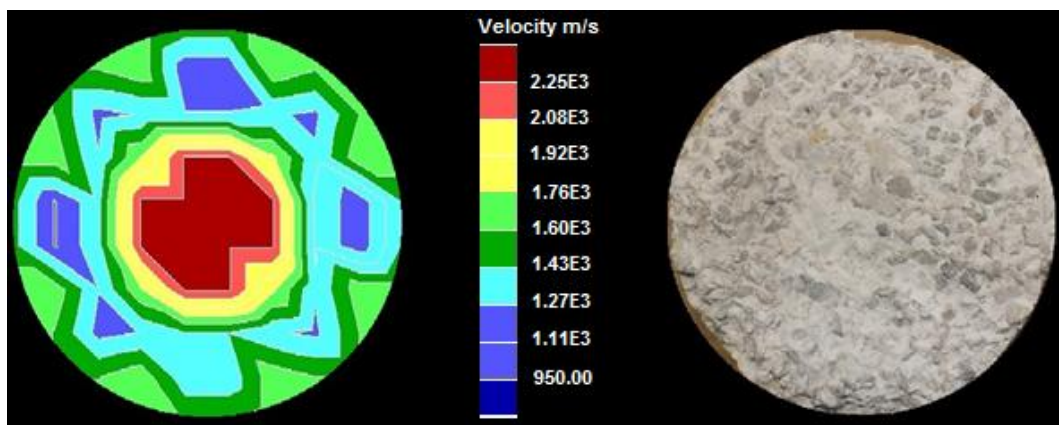


Figura 4.16 – Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

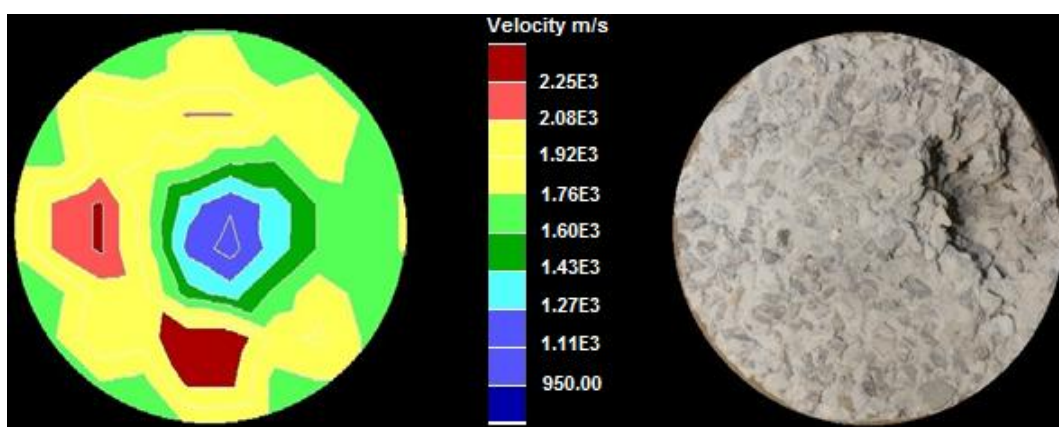


Figura 4.17 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

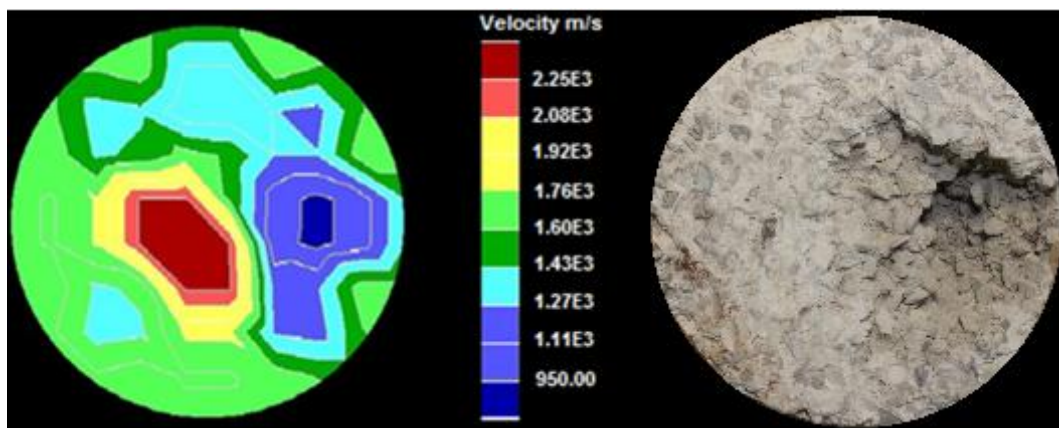


Figura 4.18 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

Quanto à amostra pré-molhada de calcário do meio poroso C, os valores mais elevados de velocidade ultra-sônica e resistência mecânica foram ambos registrados na fatia da base. É possível constata-lo através da figura 4.19, na qual se encontra uma área de grande dimensão onde foram registradas as maiores velocidades ultra-sônicas e denotando, por isso, maior compacidade. Quanto às fatias do meio e do topo, cujos tomogramas e fotografias se apresentam nas figuras 4.20 e 4.21, é

perceptível a existência de menores velocidades relativamente ao ocorrido na fatia da base. Daí se explicam, também, os menores valores de resistência mecânica registados nas fatias do meio e do topo (vd. quadro 3.1). Tal tendência indicia que nas zonas onde o *grout* possui melhor fluidez, ou seja, mais perto do local de injeção (base), melhores são as resistências mecânicas. Desta forma, a melhor fluidez do *grout* permite-lhe uma melhor penetração nos vazios do meio poroso e daí resulta uma melhor ligação entre o *grout* e as partículas do meio poroso, que origina posteriormente melhores resistências mecânicas resultantes de uma transferência de tensões mais eficiente na interface *grout*/meio poroso. Pode ainda dizer-se que nestas zonas das amostras, com maior proximidade ao local de injeção, o meio poroso injectado apresenta maior propensão para se comportar como um verdadeiro material compósito.

Igualmente nas figuras 4.19, 4.20 e 4.21, é possível perceber a semelhança entre os tomogramas obtidos nos planos correspondentes às fotografias com as quais se comparam, principalmente através do preenchimento das zonas evidenciadas nas fotografias por vazios com as cores correspondentes às menores velocidades ultra-sónicas nos tomogramas.

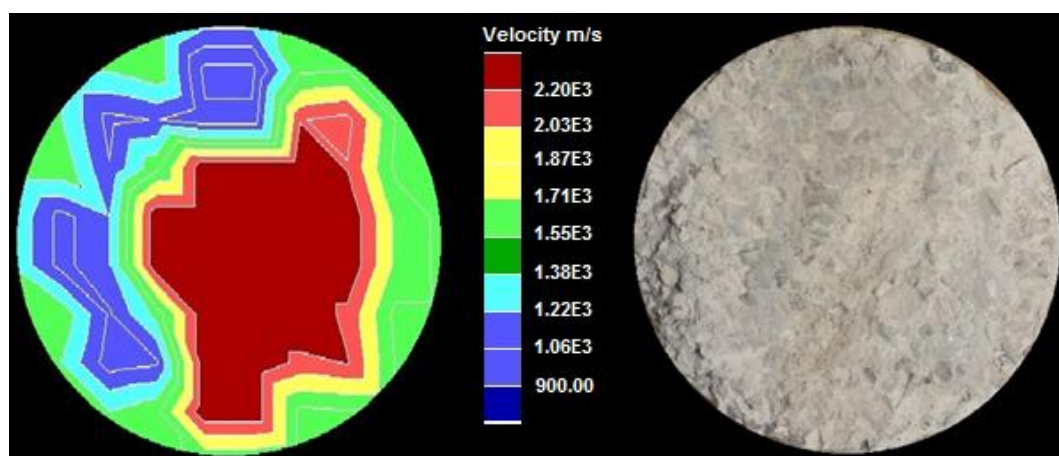


Figura 4.19 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

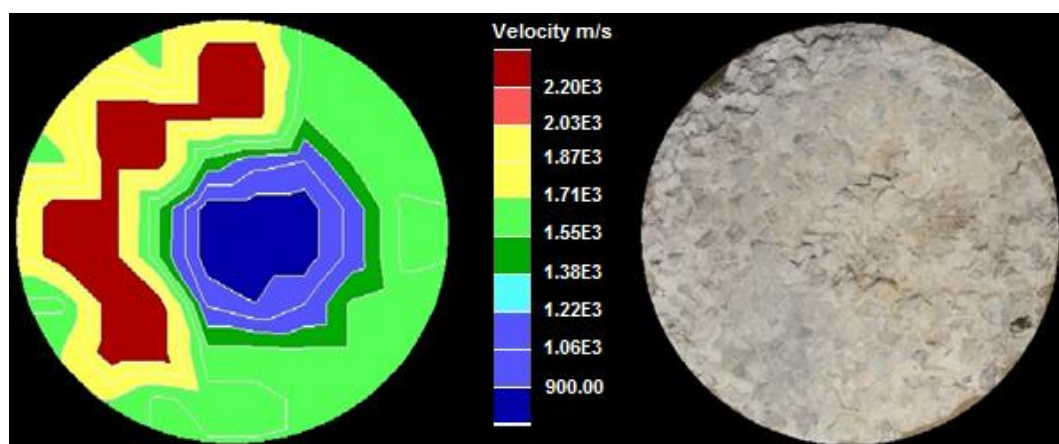


Figura 4.20 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

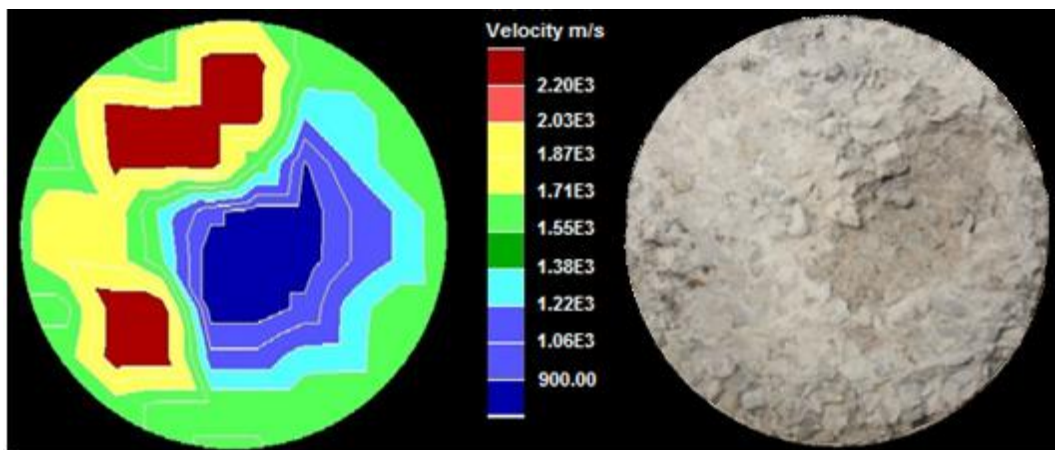


Figura 4.21 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

4.3.1.2. Meio poroso D

Analisando as amostras de calcário do meio poroso D, pode verificar-se através da figura 4.22 que, globalmente, as maiores velocidades ultra-sónicas foram registadas na amostra pré-molhada. Neste caso particular, os tomogramas dão a entender uma tendência diferente da verificada em 3.4.2, onde se registaram velocidades médias de ultra-sons muito semelhantes nas duas amostras.

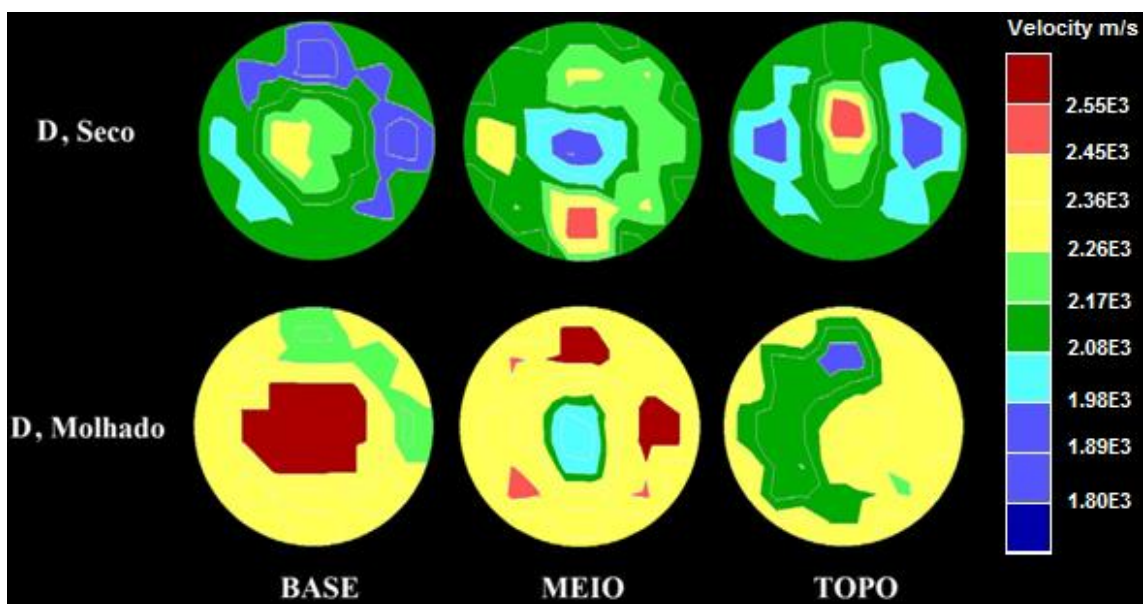


Figura 4.22 - Meio poroso D: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário

Concentrando a análise apenas na amostra seca de calcário deste meio poroso, constatou-se que na fatia da base foi onde se registaram as menores velocidades ultra-sónicas, e que tal está de acordo com as menores resistências mecânicas registadas nessa fatia (vd. 3.4.2) relativamente às restantes. Na fatia da base, como é possível verificar através da figura A.1, constatou-se a existência

de uma zona de dimensão significativa preenchida a azul (correspondente a menores velocidades ultra-sónicas).

Relativamente às fatias do meio e do topo, como é visível através das figuras A.2 e A.3, verificou-se a existência de menores áreas preenchidas a azul do que na fatia da base e, portanto, parece poder constatar-se a existência de maiores velocidades ultra-sónicas nestas duas fatias relativamente ao verificado na fatia da base.

De referir que, nesta amostra não se identificaram vazios de dimensões significativas nas faces das fatias após o corte da amostra e não se verificaram igualmente zonas dos tomogramas onde fosse susceptível a existência de vazios de dimensões significativas.

Quanto à amostra pré-molhada de calcário do meio poroso D, pôde constatar-se a existência de um gradiente negativo da velocidade de ultra-sons em função da altura da amostra. Como se pode verificar a partir das figuras A.4, A.5 e A.6, as zonas preenchidas a *bordeaux* (respeitantes às mais elevadas velocidades ultra-sónicas e a uma maior compacidade) são mais abundantes na fatia da base, enquanto as zonas preenchidas a azul (respeitantes a menores velocidades ultra-sónicas e a uma menor compacidade) são mais extensas na fatia do topo. Tal como no caso seco, a comparação dos tomogramas com as fotografias foi coerente pois os tomogramas não sugeriram, em nenhum caso, a existência de vazios de dimensões significativas.

No entanto, embora as velocidades de ultra-sons registadas na amostra pré-molhada variem segundo um gradiente negativo ao longo da altura, as resistências mecânicas (vd. quadro 3.3) aparentam estar relacionadas com algo mais do que apenas com a compacidade e densidade do meio. Possivelmente, as resistências mecânicas neste caso foram afectadas de forma mais significativa pela coesão das ligações agregado-*grout* do que por outros factores, como a penetrabilidade do *grout* (esta sim, claramente em consonância com os valores de velocidades ultra-sónicas).

Os resultados obtidos nas duas amostras indiciam que na fatia do meio foi onde o *grout* conseguiu efectuar uma melhor penetração nos vazios do meio poroso. Possivelmente, esta foi a zona onde o *grout* adquiriu a relação óptima água/ligante. Uma vez que na base se encontrava com uma elevada relação água/ligante e a pressão capilar era inferior ao ocorrido no meio poroso C, as ligações que criou com as partículas do meio poroso nessa zona não foram tão boas e resultaram, após o processo de cura, na existência de uma maior quantidade de vazios relativamente ao ocorrido na fatia do meio. Assim sendo, pode inferir-se que a relação água/ligante do *grout* foi diminuindo à medida que este penetrou a amostra e, ao atingir o valor óptimo, originou que na fatia do meio a quantidade de vazios existentes após o processo de cura fosse inferior ao ocorrido na base. Consequentemente, as velocidades de ultra-sons e as resistências mecânicas registadas na fatia do meio foram superiores às registadas nas restantes fatias.

Outra possível explicação para os resultados obtidos pode estar relacionada com a elevada relação água/ligante do *grout* na fatia da base originando um menor peso volúmico deste e, consequentemente, uma menor resistência mecânica. No entanto, crê-se que a rotura das amostras nos

ensaios de compressão diametral esteja directamente relacionada com a qualidade do comportamento das amostras nas interfaces agregado/*grout* e não dependa substancialmente das resistências mecânicas individuais de cada um dos materiais constituintes dos meios porosos injectados.

Globalmente, as amostras do meio poroso D apresentaram uma tendência de variação da velocidade de ultra-sons ao longo da altura, ou gradiente, oposta nos casos seco e pré-molhado. No caso seco a velocidade ultra-sónica apresentou um gradiente positivo ao longo da altura da amostra, ao contrário do ocorrido na amostra pré-molhada, onde este gradiente se evidenciou como sendo negativo.

4.3.1.3. Meio poroso E

Relativamente às amostras de calcário do meio poroso E, os tomogramas obtidos para comparação da amostra seca com a amostra pré-molhada foram os que se apresentam na figura 4.23. Como é possível verificar, as maiores velocidades ultra-sónicas foram obtidas na amostra seca.

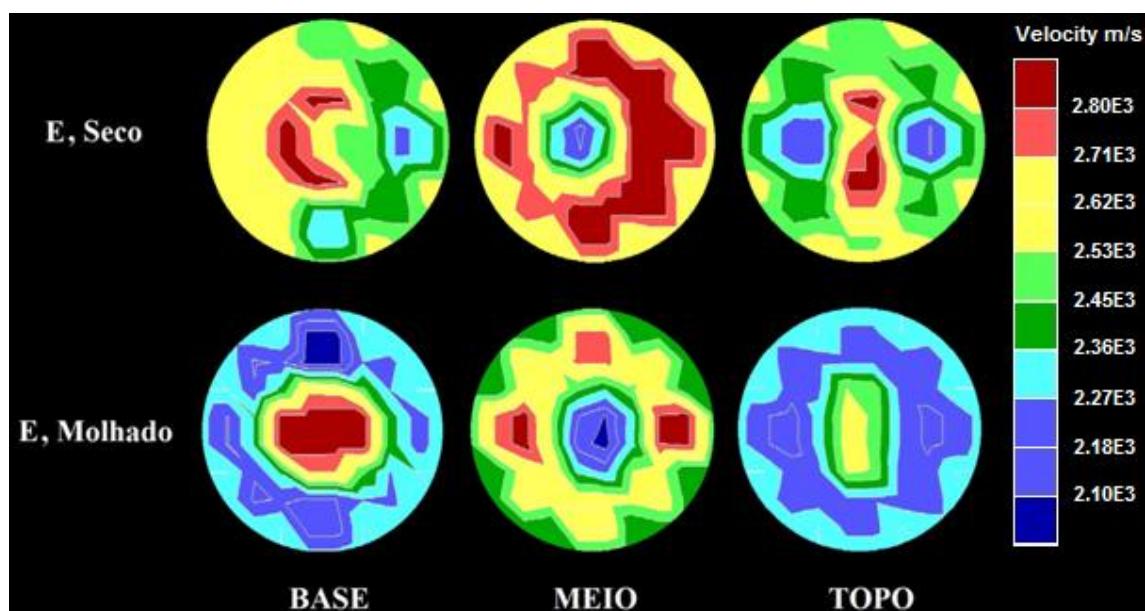


Figura 4.23 - Meio poroso E: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras seca e pré-molhada, respectivamente, de calcário

Ajustando as restrições de velocidades e a sua escala apenas para a amostra seca de calcário deste meio poroso, os tomogramas obtidos relativos às diferentes zonas da amostra encontram-se ilustradas nas figuras A.7, A.8 e A.9. Como é possível verificar, as velocidades ultra-sónicas apresentaram uma variação negativa (não muito significativa) ao longo da altura da amostra, principalmente visível através das zonas preenchidas a azul.

Quanto à resistência mecânica, uma explicação para a sua tendência evolutiva ao longo da altura da amostra seca aquando da injeção (vd. quadro 3.5) é a variação da relação água/ligante do *grout*. Sendo injectado com uma elevada relação água/ligante, o *grout* foi perdendo água para o meio poroso à medida que o atravessava. Esta perda de água do *grout* originou que a quantidade de água

não absorvida pelo meio poroso fosse próxima da mínima necessária para a hidratação das partículas de ligante e proporcionou, desta forma, melhores ligações entre o agregado e o *grout*. Consequentemente, as resistências mecânicas registadas foram superiores nas zonas mais afastadas do local de injeção.

É de notar que, a estrutura sólida deste meio poroso permitiu a existência de um menor volume de vazios a preencher por parte do *grout* do que o existente no meio poroso D. Mais concretamente, no meio poroso E as partículas de dimensão média colmataram parcialmente os vazios existentes entre as partículas grossas. Este rearranjo da estrutura sólida do meio poroso conduziu à existência de vazios de menores dimensões no espaço interparticular, comparativamente aos existentes no meio poroso D onde as partículas apresentavam todas aproximadamente a mesma dimensão. Sendo a pressão capilar inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, a menor dimensão dos vazios existentes no meio poroso E conduziu a uma pressão capilar superior à existente no meio poroso D e, desta forma, a uma redução mais acentuada da relação água/ligante da fatia da base para a fatia do topo. Consequentemente, o aumento da resistência mecânica ao longo da altura das amostras foi superior no meio poroso E (56%, vd. quadro 3.5) relativamente ao verificado no meio poroso D (32%, vd. quadro 3.3). Comparativamente aos resultados obtidos no meio poroso C (vd. quadro 3.1), as maiores resistências à tracção por compressão diametral registadas no meio poroso E podem estar também relacionadas com o facto de, neste último, existirem partículas de maiores dimensões e, como tal, um menor número de interfaces agregado-*grout*. Como o ensaio de resistência à tracção por compressão diametral é condicionado pela qualidade das ligações entre o agregado e o *grout*, o menor número destas interfaces existente no meio poroso E favoreceu a obtenção de maiores valores de resistência mecânica.

Quanto à amostra pré-molhada de calcário do meio poroso E, as distribuições de velocidades ultra-sónicas nas suas diferentes fatias encontram-se ilustradas nas figuras A.10, A.11 e A.12.

Como é possível verificar, existe uma clara tendência de diminuição da velocidade ultra-sónica ao longo da altura da amostra. Na fatia da base foi onde se registaram os maiores valores de velocidade ultra-sónica, como se pode perceber através da zona preenchida a *bordeaux* enquanto, por sua vez, na fatia do topo foi onde se registaram os valores mais reduzidos de velocidade ultra-sónica, como é perceptível através da menor área preenchida a *bordeaux*, como também pela maior área preenchida a verde mais escuro, relativamente ao ocorrido nas restantes fatias.

As diferenças entre as tendências obtidas nos casos seco e pré-molhado estão relacionadas com a maior heterogeneidade estrutural do meio no caso seco relativamente ao caso pré-molhado. Daí resultou que fenómenos como a penetrabilidade ou a injectabilidade do *grout* fossem bastante heterogéneos ao longo da altura da amostra no caso seco.

Tal como ocorrido nas amostras do meio poroso D, a comparação dos tomogramas das amostras do meio poroso E com as fotografias foi coerente, pois os tomogramas não sugeriram, em nenhum caso, a existência de vazios de dimensões significativas.

4.3.2. Cerâmica

Passando ao estudo das amostras cerâmicas, os tomogramas representativos das amostras secas dos três meios porosos estudados encontram-se na figura 4.24. Como é possível verificar, existe uma tendência de aumento da velocidade de ultra-sons da base para o topo nos meios poroso D e E. No entanto, verificou-se que no meio poroso C a velocidade ultra-sônica diminuiu ao longo da altura, facto principalmente visível através da comparação das fatias de base e topo. Tal tendência resultou, como se verá adiante, do estado pouco compacto em que se encontravam as fatias do meio e do topo dessa amostra.

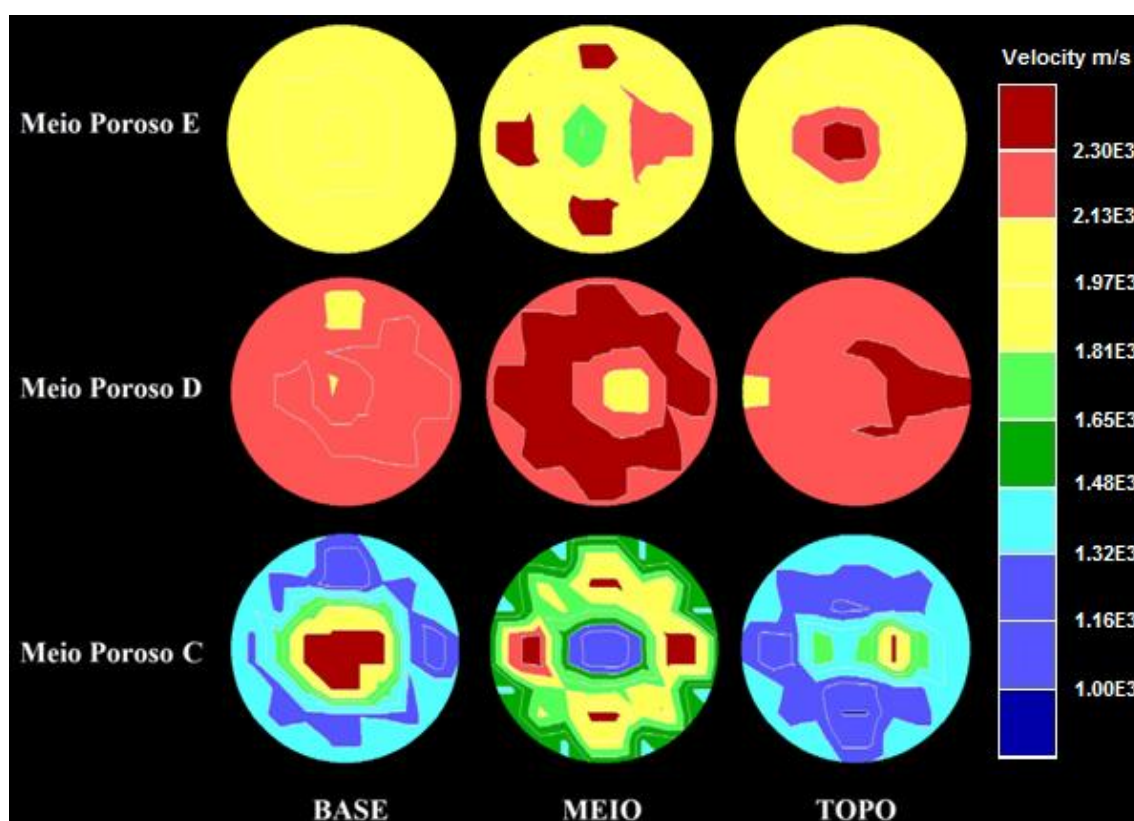


Figura 4.24 - Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras cerâmicas secas dos três meios porosos em estudo

Quanto às amostras cerâmicas pré-molhadas, verificou-se globalmente a existência de uma tendência de diminuição da velocidade de ultra-sons da base para o topo, como se pode verificar através da figura 4.25. O único caso a não apresentar a tendência anteriormente referida foi o meio poroso D, no qual a velocidade de ultra-sons aumentou com a altura.

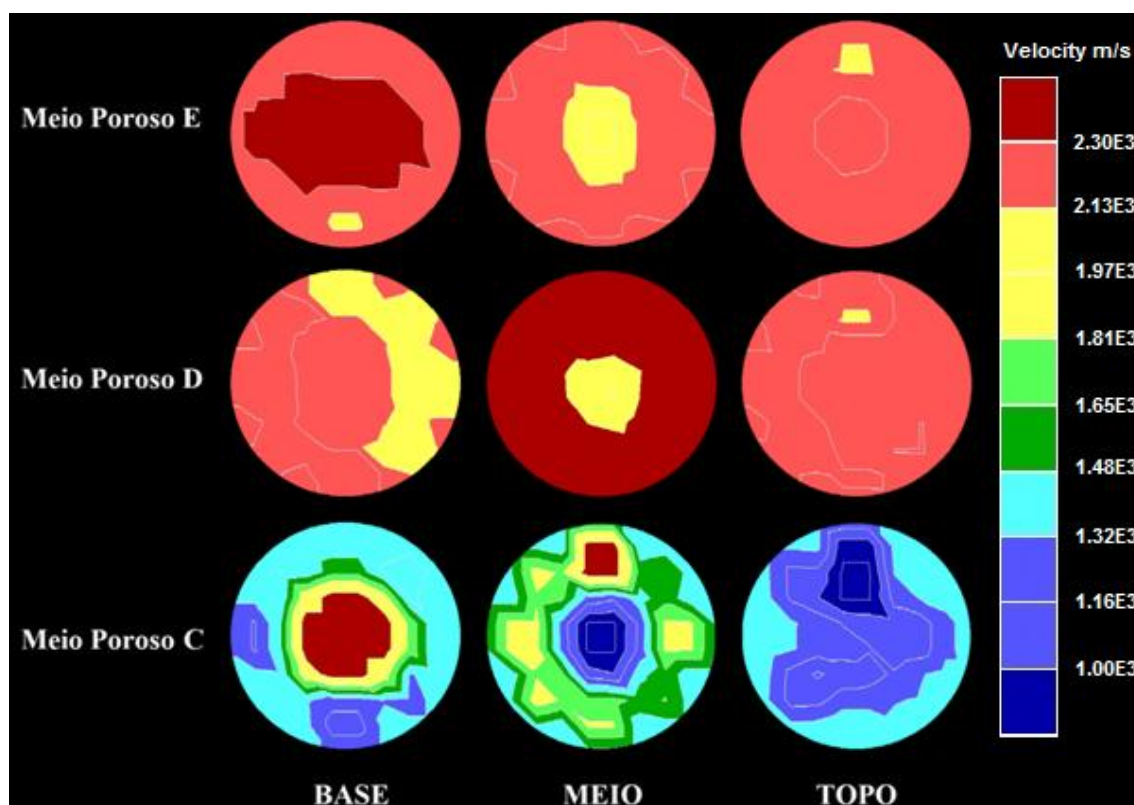


Figura 4.25 - Tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras cerâmicas pré-molhadas dos três meios porosos em estudo

Globalmente, no caso das amostras que se encontravam secas aquando da injeção, os maiores valores de velocidade ultra-sónica foram registados no meio poroso D, seguido dos meios porosos E e C, respectivamente. Quanto ao caso de pré-molhagem das amostras, as maiores velocidades foram registadas nos meios porosos E e D, sendo ambas claramente superiores às registadas nas fatias da amostra do meio poroso C.

4.3.2.1. *Meio poroso C*

Analisando apenas as amostras cerâmicas do meio poroso C pode verificar-se, através da figura 4.26, que as velocidades ultra-sónicas foram globalmente superiores no caso seco, tendo sido apenas no topo que aparentemente as velocidades ultra-sónicas foram superiores no caso pré-molhado.

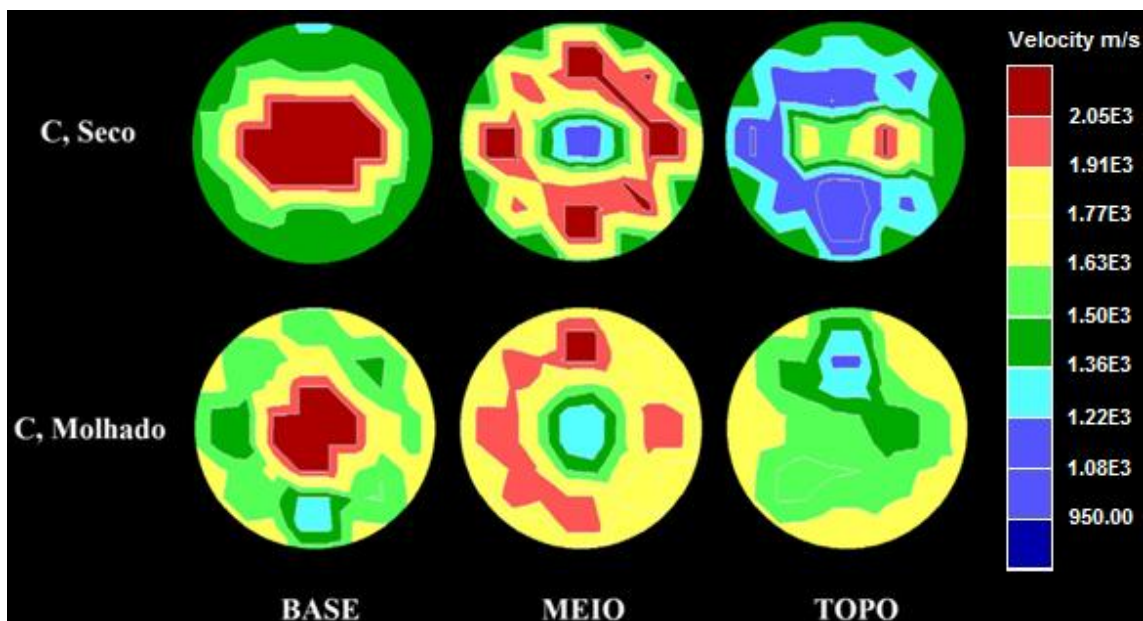


Figura 4.26 - Meio poroso C: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente

Analisando apenas a amostra seca, os tomogramas respeitantes às fatias da base, meio e topo encontram-se nas figuras 4.27, 4.28 e 4.29, respectivamente. Como se pode verificar através da menor área preenchida a azul, foi na base que se registaram as maiores velocidades ultra-sónicas. Por sua vez, no topo foi onde se registaram as menores velocidades, facto que se torna evidente pela grande zona preenchida a azul no tomograma respeitante à fatia do topo.

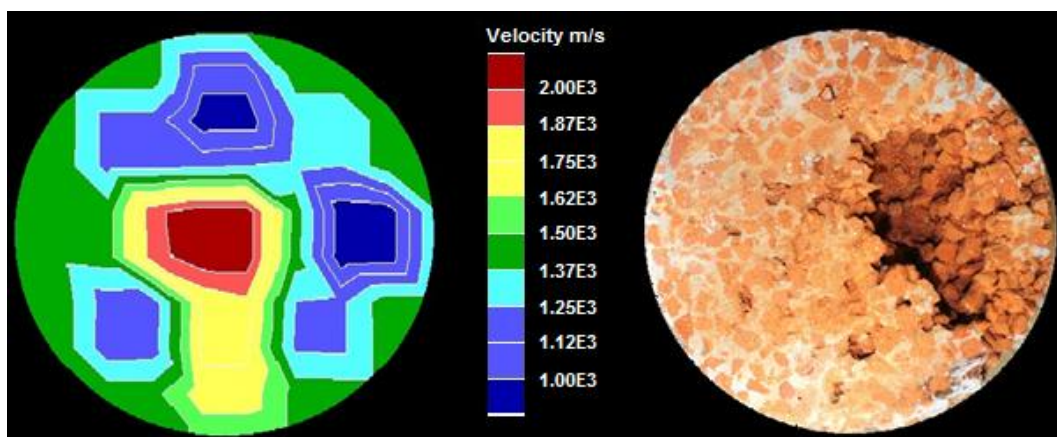


Figura 4.27 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

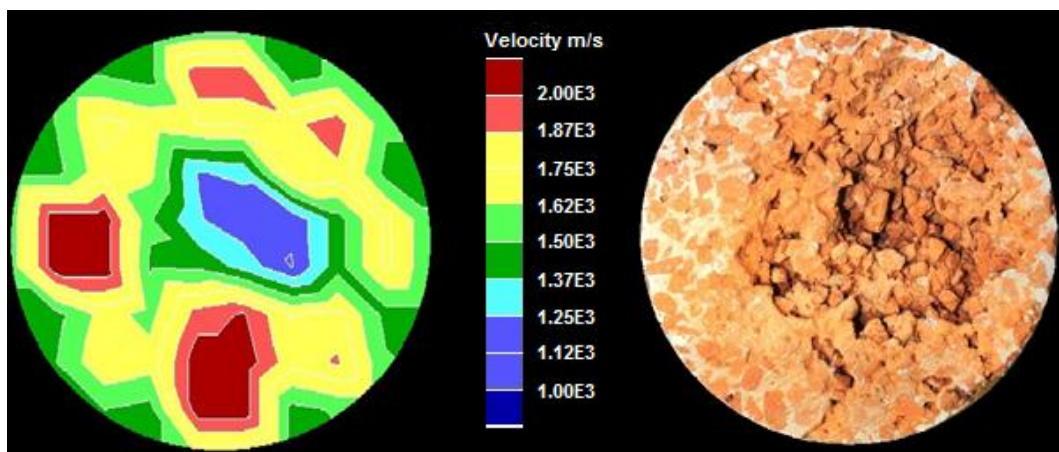


Figura 4.28 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

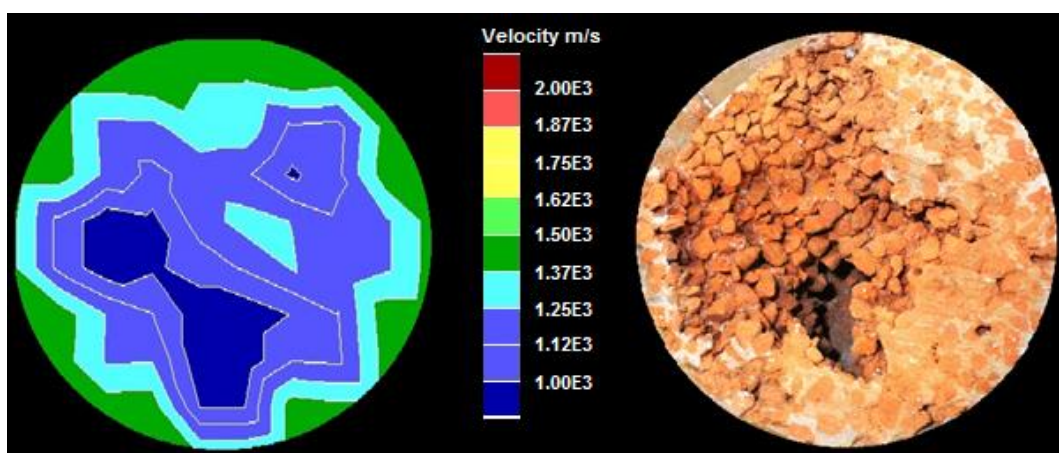


Figura 4.29 - Meio poroso C, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica

Importa salientar a elevada semelhança evidenciada entre os tomogramas e as fotografias tiradas às fatias desta amostra após o seu corte, sendo as zonas identificadas nos tomogramas com velocidades ultra-sónicas inferiores a cerca de 1370 m/s correspondentes a zonas de reduzida compacidade (ou, em alguns casos, vazios) nas fotografias das amostras nesses planos. Esta forte semelhança sugere a fiabilidade de utilização de tomografia ultra-sónica na avaliação não destrutiva da morfologia interna de alvenarias injectadas com *grout*.

Quanto à amostra cerâmica pré-molhada do meio poroso C, os tomogramas respeitantes às diferentes fatias encontram-se ilustrados nas figuras 4.30, 4.31 e 4.32. É possível verificar uma tendência de evolução negativa das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura da amostra.

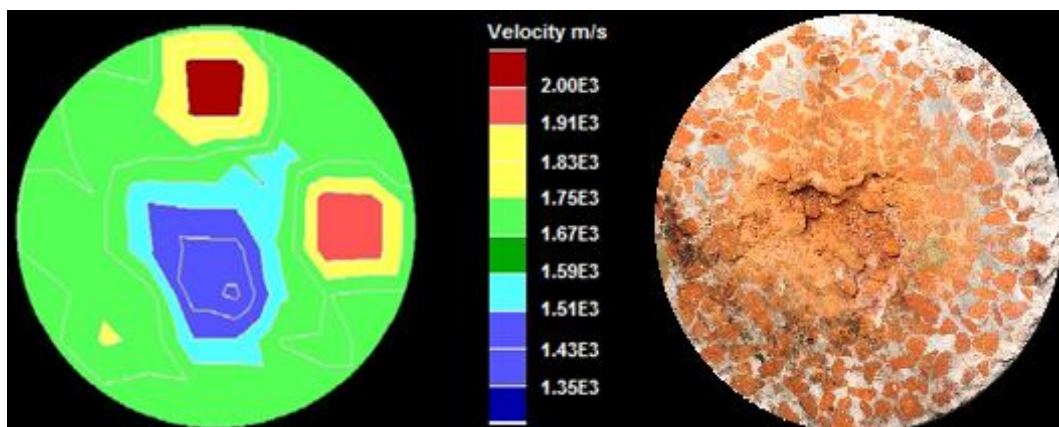


Figura 4.30 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

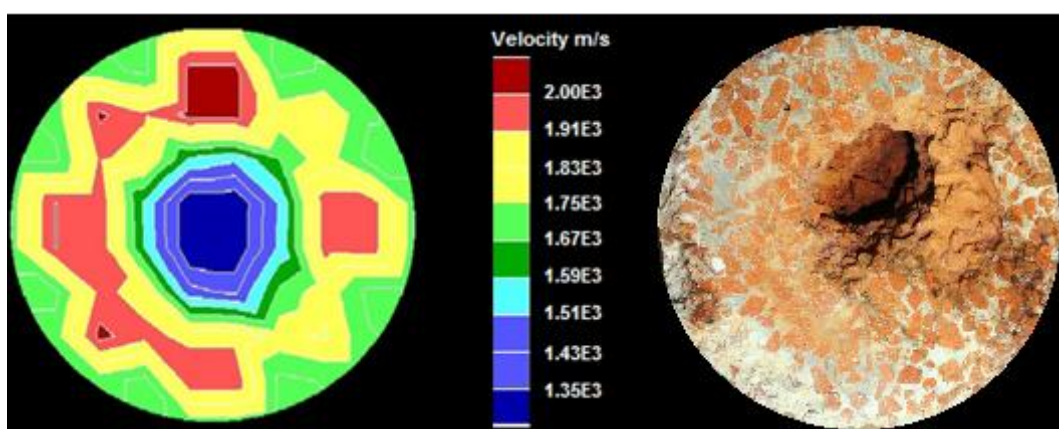


Figura 4.31 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

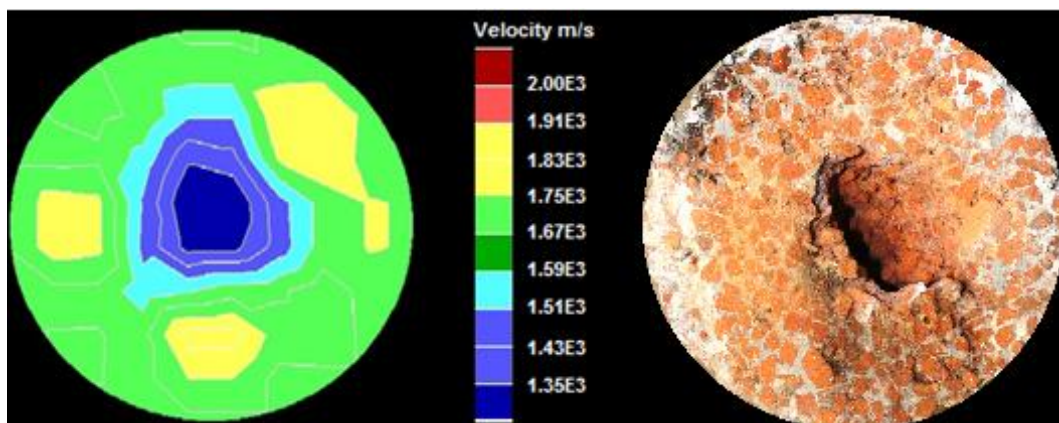


Figura 4.32 - Meio poroso C, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica

Como visto em 3.4.1, registou-se em ambas as amostras cerâmicas deste meio poroso uma diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura (vd. quadro 3.2). Tal como sucedido nas amostras de calcário deste meio poroso, esta tendência deveu-se à reduzida dimensão dos poros existentes entre as partículas, que consequentemente originou uma maior dificuldade de penetração do *grout* devido à floculação das partículas de ligante à entrada ou no

interior dos poros que provocou o bloqueio à sua passagem. Tal fenómeno foi evidenciado neste meio poroso através do estado pouco coeso apresentado pelas fatias do meio e do topo, como se pode verificar nas figuras 4.28, 4.29, 4.31 e 4.32. Crê-se que a existência de vazios nestas mesmas fatias denuncia a ocorrência de fenómenos de filtração e consequentes bloqueios à passagem do *grout* para algumas zonas do meio poroso. Como consequência directa da ocorrência destes fenómenos, as duas fatias referidas apresentaram resistências mecânicas inferiores ao que seria expectável tendo em conta a resistência mecânica apresentada pela fatia da base.

De acordo com o referido em 3.4.1, apesar de a pré-molhagem ter originado um decréscimo de cerca de 13% no que diz respeito às velocidades ultra-sónicas médias neste meio poroso, não provocou alterações dignas de registo no que respeita à resistência mecânica. Conclui-se que apesar de na amostra seca existir aparentemente um menor volume de vazios, em termos de comportamento mecânico a qualidade das ligações entre o agregado e o *grout* injectado foi superior na amostra pré-molhada.

É importante salientar, novamente, a elevada semelhança entre todos os tomogramas e as fotografias dos respectivos planos, tiradas às fatias da amostra após o seu corte.

4.3.2.2. Meio poroso D

Quanto ao meio poroso D, a figura 4.33 dá a entender que as maiores velocidades ultra-sónicas foram registadas na amostra sujeita a pré-molhagem, principalmente pela área preenchida a *bordeaux* (respeitante à gama de maiores valores de velocidade ultra-sónica no respectivo plano).

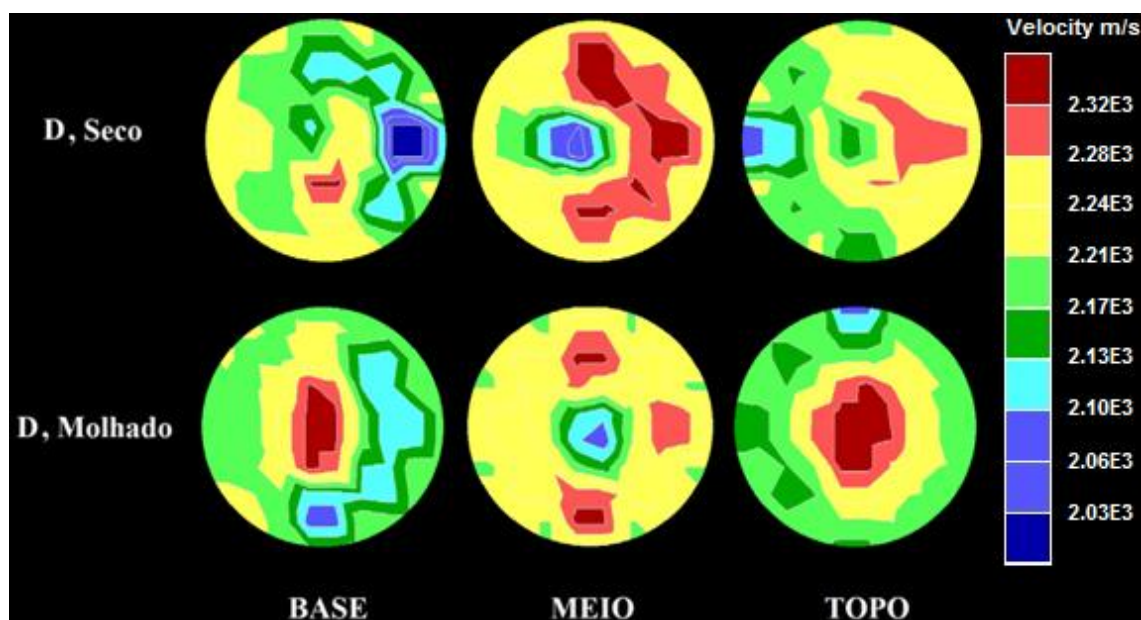


Figura 4.33 - Meio poroso D: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente

Analisando apenas a amostra cerâmica seca do meio poroso D, verifica-se uma tendência de aumento da velocidade de ultra-sons ao longo da altura da amostra, como é possível observar através

das figuras A.13, A.14 e A.15, principalmente visível através da diminuição da área preenchida a azul mais escuro.

Quanto à amostra cerâmica pré-molhada do meio poroso D, não houve variações significativas das velocidades ultra-sônicas ao longo da altura da amostra, como se pode observar através das figuras A.16, A.17 e A.18. Importa referir que, neste caso particular, a injeção foi praticamente homogênea ao longo de toda a amostra. Como se pode verificar no quadro 3.4, os valores médios de velocidade ultra-sônica e resistência mecânica foram praticamente constantes ao longo da altura da amostra.

4.3.2.3. Meio Poroso E

Tal como no meio poroso D, a figura 4.34 dá a entender que as maiores velocidades ultra-sônicas registadas no meio poroso E ocorreram na amostra sujeita a pré-molhagem, principalmente pela área preenchida a *bordeaux*.

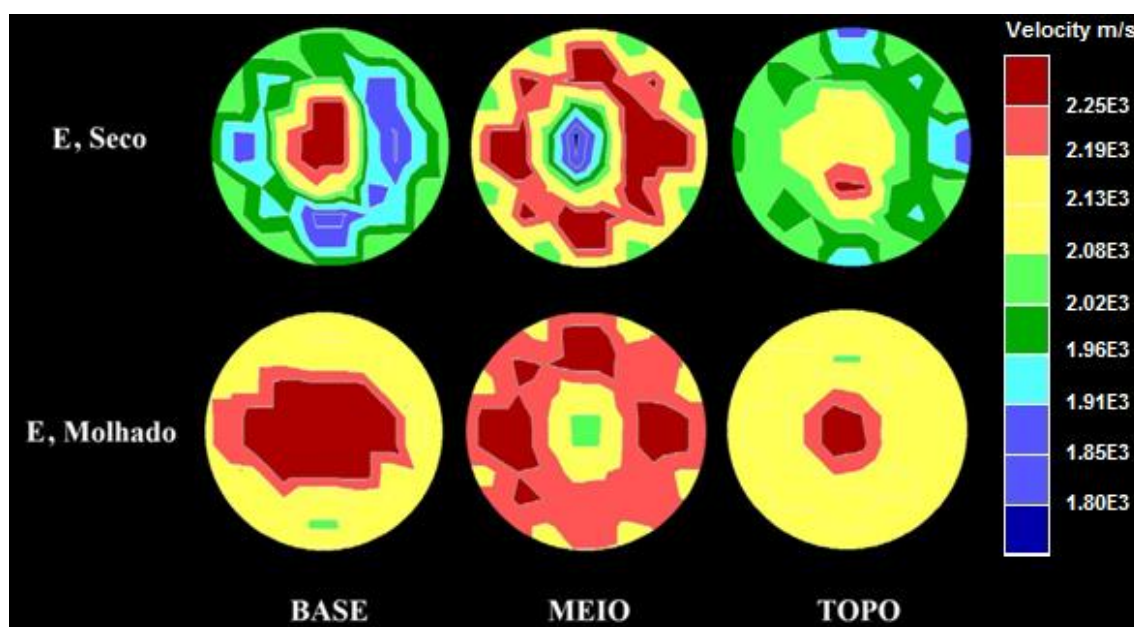


Figura 4.34 - Meio poroso E: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras cerâmicas seca e pré-molhada, respectivamente

Analisando apenas a amostra cerâmica seca do meio poroso E, as figuras A.19, A.20 e A.21 evidenciam a existência de um gradiente positivo de variação da velocidade ultra-sônica ao longo da altura da amostra, principalmente através da comparação das áreas preenchidas a azul de cada uma das fatias.

Quanto à amostra cerâmica pré-molhada do meio poroso E, verificou-se a existência de um gradiente negativo da variação da velocidade ultra-sônica ao longo da altura da amostra, como se pode observar através das figuras A.22, A.23 e A.24.

É interessante verificar que, contrariamente ao ocorrido na amostra cerâmica do meio poroso C, a pré-molhagem da amostra cerâmica do meio poroso E proporcionou um aumento das velocidades

ultra-sónicas registadas. Tal diferença deve-se à elevada porosidade das partículas cerâmicas, e à elevada pressão capilar existente num meio poroso constituído por partículas finas deste material. Tais factos conduzem a que num meio deste material com uma grande quantidade de poros de reduzidas dimensões (contendo partículas finas) seja absorvida muita água da pré-molhagem, originando que os vazios colmatados pela água da pré-molhagem não sejam penetrados por *grout*. Após a evaporação da água da pré-molhagem resultam vazios nas zonas onde o *grout* não penetrou e consequentemente menores velocidades ultra-sónicas. No meio poroso E, a não existência de partículas finas resulta numa menor pressão capilar exercida pelas partículas do meio. Tal origina uma menor absorção da água da pré-molhagem e possibilita uma penetração mais eficaz do *grout* relativamente ao ocorrido no meio poroso C. Existindo menos água livre, no processo de cura serão originados menos vazios. Desta forma, obtém-se um meio poroso com maior compacidade que origina, consequentemente, a obtenção de maiores valores de velocidades ultra-sónicas.

Quanto ao meio poroso C, o efeito da pré-molhagem foi igualmente distinto nos dois materiais. Enquanto nas amostras de calcário a pré-molhagem permitiu a obtenção de maiores valores de velocidades ultra-sónicas, nas amostras cerâmicas a pré-molhagem traduziu-se numa diminuição dos valores de velocidade ultra-sónica registados. Pode dizer-se que, no meio poroso C, a pré-molhagem das amostras permite uma melhor penetrabilidade do *grout* nas amostras de calcário e constitui um factor adverso à penetração do *grout* nas amostras cerâmicas. Sendo que, o efeito associado à pré-molhagem nas amostras cerâmicas ocorre, possivelmente, devido à grande capacidade de absorção de água por parte das suas partículas, impossibilitando sobretudo a penetração do *grout* nos poros de menor dimensão que apresentam maior pressão capilar. Posteriormente, após o processo de cura verifica-se um aparecimento de maior volume de vazios, conduzindo à obtenção de menores velocidades ultra-sónicas.

4.3.3. Comparação entre as amostras de calcário e as amostras cerâmicas

Após a análise das amostras de cada material separadamente, procede-se em seguida à comparação entre os tomogramas obtidos nas amostras de calcário e cerâmica.

Começando pelas amostras do meio poroso C seco aquando da injeção, os tomogramas obtidos nas amostras dos diferentes materiais apresentam-se na figura 4.35.

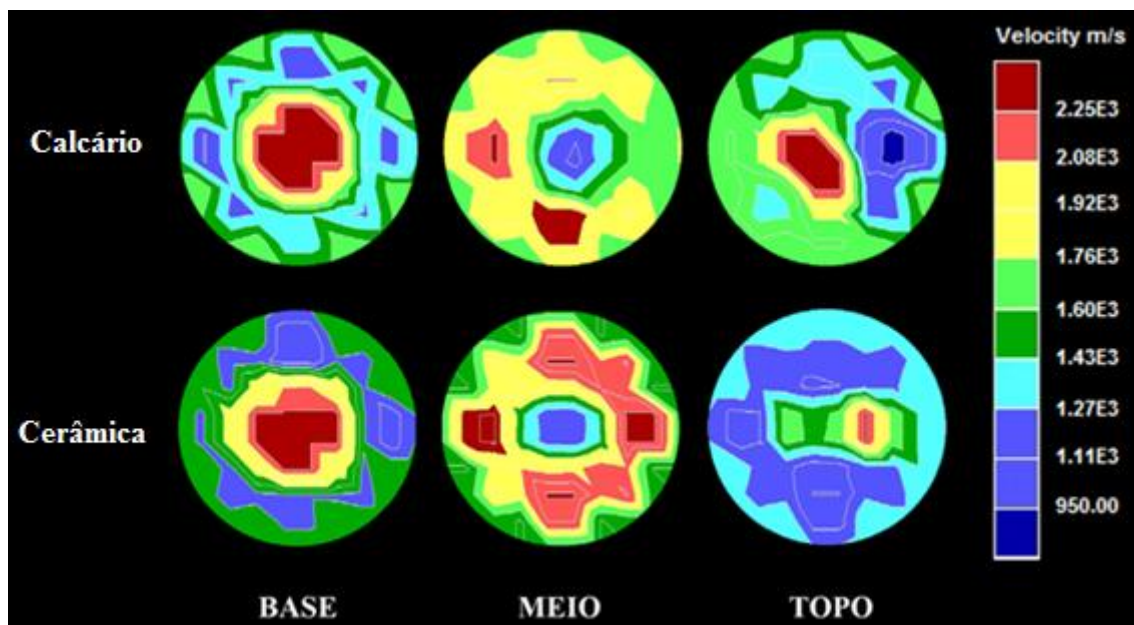


Figura 4.35 – Meio poroso C, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras de calcário e cerâmica

Tal como visto em 3.4, as velocidades ultra-sônicas destas duas amostras não apresentaram diferenças significativas, devendo-se à qualidade das ligações efectuadas entre o *grout* e o meio poroso a diferença verificada entre as resistências mecânicas obtidas nas duas amostras (vd. quadros 3.1 e 3.2).

Quanto às amostras dos dois materiais relativas ao meio poroso C pré-molhado, os tomogramas obtidos encontram-se na figura 4.36.

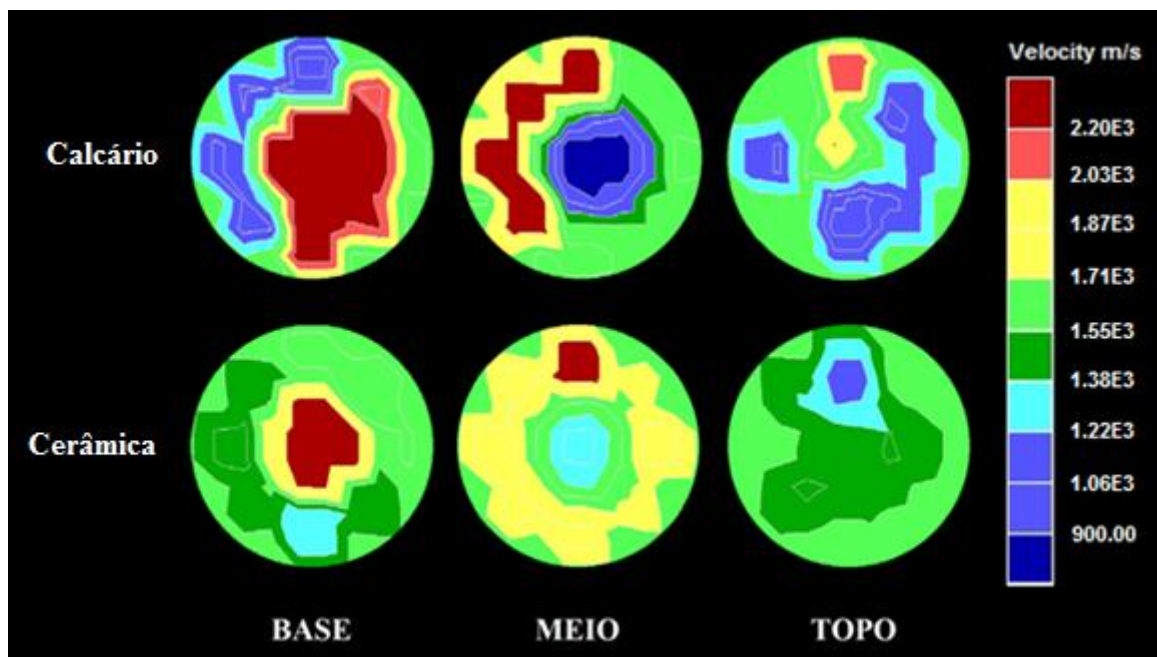


Figura 4.36 - Meio poroso C, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras de calcário e cerâmica

Como é possível verificar através da figura 4.36, as maiores velocidades ultra-sónicas parecem ter sido registadas na amostra de calcário, atendendo principalmente à maior extensão das áreas preenchidas a *bordeaux*. No entanto, em termos de resistências mecânicas, o factor que parece ter sido mais influente nos resultados (vd. quadros 3.1 e 3.2) foi a existência de zonas com velocidades ultra-sónicas mais baixas. Como se pode observar, na amostra de calcário as zonas preenchidas a azul são muito mais extensas do que na amostra cerâmica. Tal indicia que, além das ligações estabelecidas entre o *grout* e o meio poroso terem sido de melhor qualidade nas amostras cerâmicas, neste meio poroso a injeção foi mais heterogênea na amostra de calcário e resultou no posterior aparecimento de vazios de dimensões significativas.

No meio poroso D, os tomogramas obtidos nas amostras secas dos dois diferentes materiais encontram-se na figura 4.37.

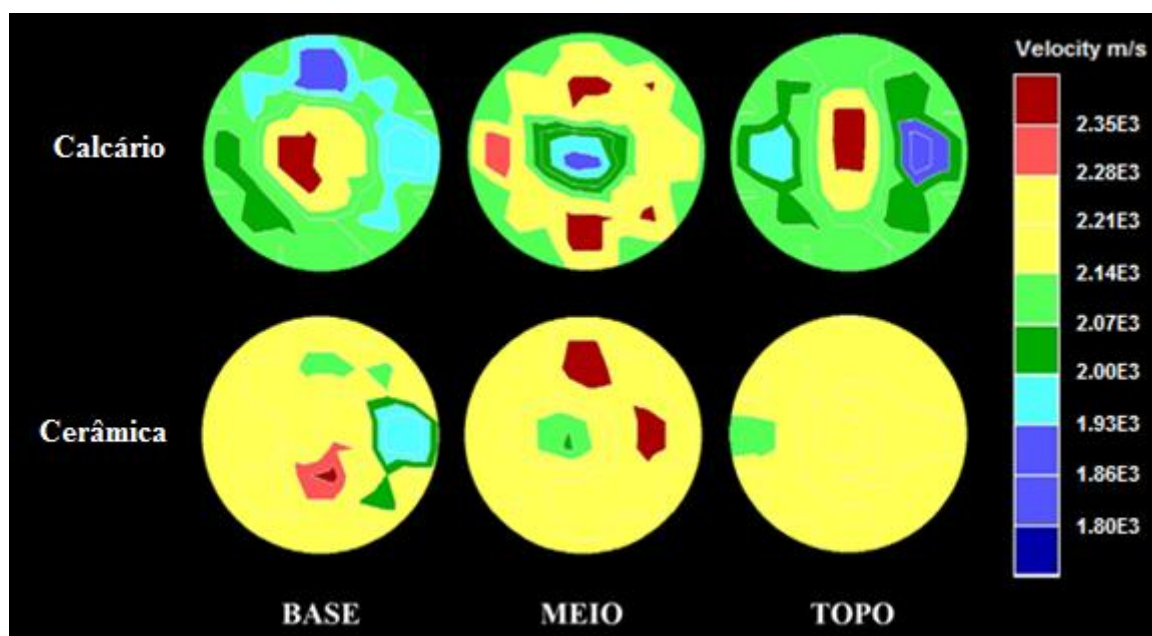


Figura 4.37 - Meio poroso D, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica

Contrariamente ao verificado em 3.4, os tomogramas dão a entender a existência de maiores velocidades ultra-sónicas na amostra cerâmica relativamente ao verificado na amostra de calcário. Possivelmente, tal diferença resulta da existência de zonas de maior compacidade (preenchidas na figura a *bordeaux* e relativas a velocidades ultra-sónicas elevadas) mais extensas na amostra de calcário, que pode ter influenciado de forma significativa a velocidade média registada em cada amostra. No entanto, os tomogramas parecem ir de encontro aos resultados obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral (vd. quadros 3.3 e 3.4), nos quais a amostra cerâmica evidenciou um melhor comportamento do que a amostra de calcário. Através igualmente dos tomogramas, um possível indicador de pior comportamento mecânico é a existência de zonas mais

extensas de menor compacidade (preenchidas a azul), que parece ter contribuído para um pior comportamento mecânico da amostra de calcário relativamente ao ocorrido na amostra cerâmica.

Nas amostras dos dois materiais relativas ao meio poroso D pré-molhado, os tomogramas obtidos apresentam-se na figura 4.38. Tal como verificado anteriormente (vd. 3.4.2), as maiores velocidades ultra-sónicas foram registadas na amostra de calcário.

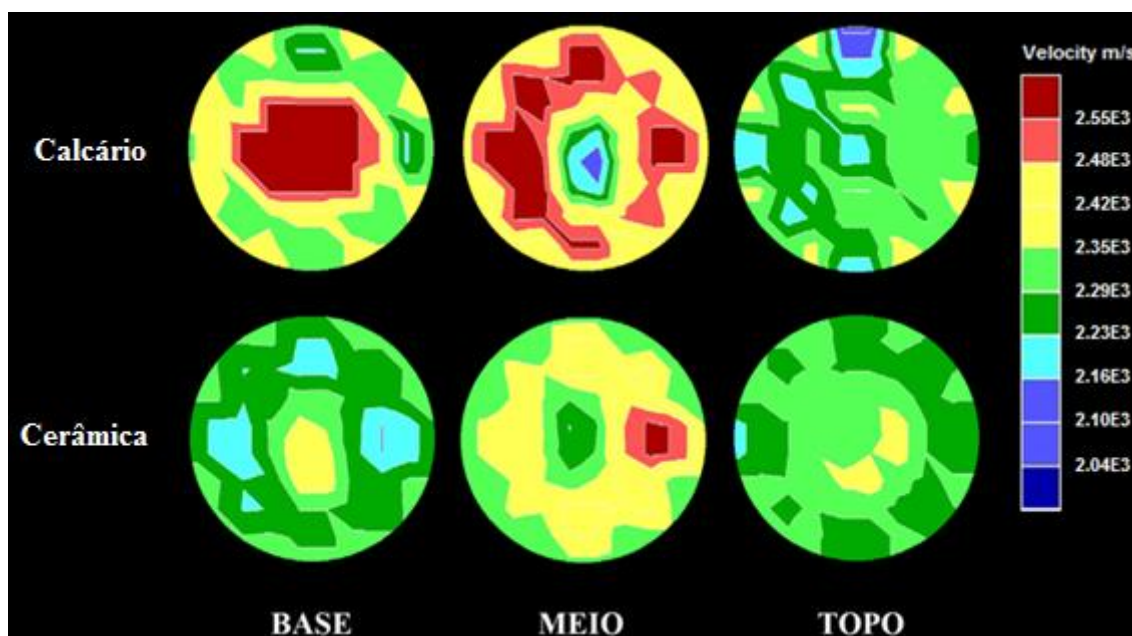


Figura 4.38 - Meio poroso D, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário e cerâmica

Relativamente ao meio poroso E, os tomogramas obtidos nas amostras secas dos dois materiais apresentam-se na figura 4.39. Como é possível verificar de forma clara, as maiores velocidades ultra-sónicas foram registadas na amostra de calcário, sendo este um caso evidente da melhor qualidade das ligações meio poroso-grout na amostra cerâmica uma vez que, apesar da existência de zonas de menor compacidade na amostra cerâmica, as resistências mecânicas das suas diferentes fatias foram superiores às verificadas nas fatias da amostra de calcário (vd. quadros 3.5 e 3.6).

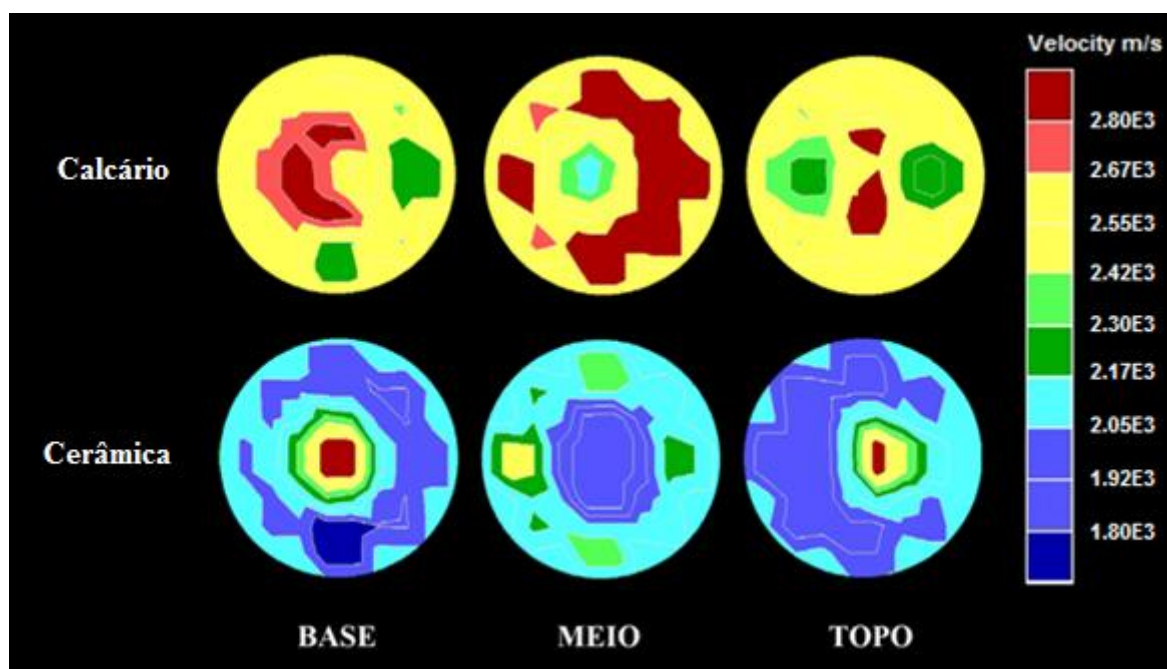


Figura 4.39 - Meio poroso E, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras de calcário e cerâmica

Finalmente, analisando os tomogramas relativos às amostras pré-molhadas dos dois materiais do meio poroso E, pode verificar-se através da figura 4.40 que as maiores velocidades ultra-sônicas foram igualmente obtidas na amostra de calcário. Esta superioridade evidencia-se, principalmente, pela extensão das suas zonas de maior compacidade (preenchidas a *bordeaux*).

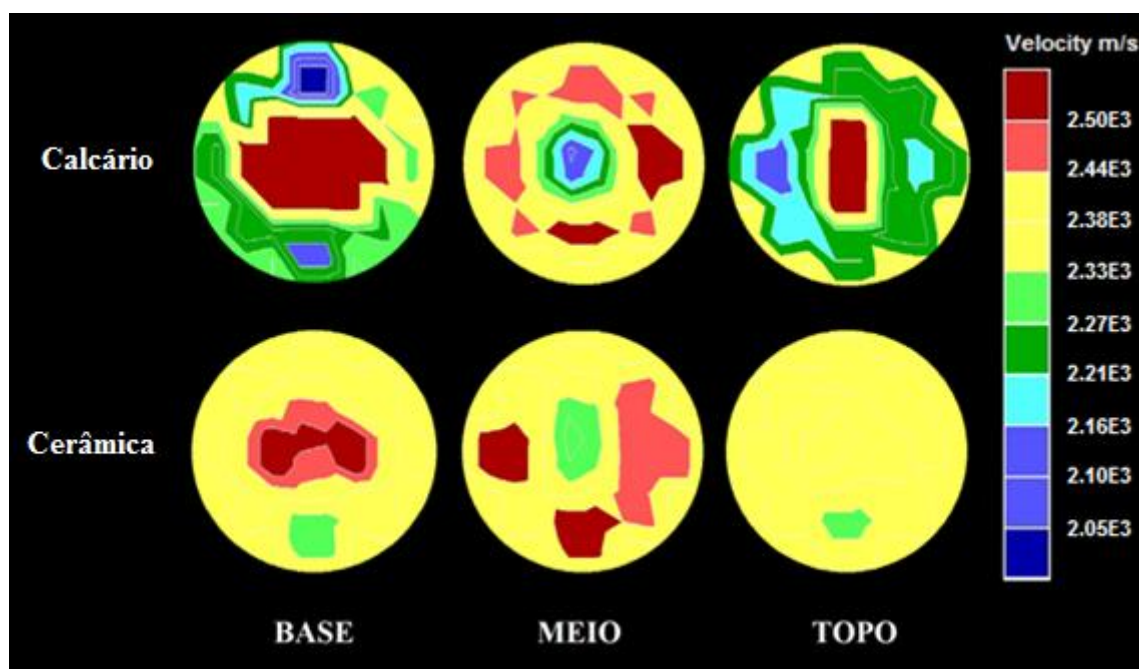


Figura 4.40 - Meio poroso E, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sônicas nas amostras de calcário e cerâmica

Fazendo um balanço da comparação entre as amostras de calcário e cerâmica verificou-se que a pré-molhagem das amostras influenciou de forma distinta as velocidades ultra-sónicas registadas nos meios porosos dos dois materiais. Nas amostras de calcário, os meios porosos D e E apresentaram maiores valores de velocidade ultra-sónica no caso das amostras que se encontravam secas aquando da injeção. Por sua vez, as amostras cerâmicas destes meios apresentaram maiores valores de velocidades ultra-sónicas no caso das amostras sujeitas a pré-molhagem. A pré-molhagem destas amostras proporcionou uma injeção mais eficiente, que se traduziu no registo de valores mais elevados de velocidades ultra-sónicas. Esta diferente variação nas amostras dos dois materiais pode ter-se devido à maior capacidade de absorção de água por parte das partículas cerâmicas que, consequentemente, originou uma menor quantidade de água existente entre as partículas dos meios porosos deste material após a sua molhagem relativamente ao ocorrido no caso das amostras de calcário (vd. quadro 2.1). Dessa forma, o “espaço” disponível para ser preenchido por *grout* na zona interparticular foi também superior nas amostras cerâmicas pré-molhadas do que nas amostras pré-molhadas de calcário e conduziu a que, após o processo de cura das amostras injectadas, o volume de vazios (resultante da evaporação da água livre retida no espaço interparticular) existente entre as partículas fosse superior nas amostras pré-molhadas de calcário relativamente ao ocorrido nas amostras cerâmicas pré-molhadas. Desta maior porosidade do espaço interparticular resultou o registo de menores velocidades ultra-sónicas nas amostras pré-molhadas de calcário relativamente ao ocorrido nas amostras secas.

Comparando os valores das velocidades ultra-sónicas registadas nos dois materiais, verificou-se que, globalmente, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras de calcário foram superiores às registadas nas amostras cerâmicas. O único caso em que tal não sucedeu foi nas amostras secas do meio poroso C, onde as velocidades registadas nos dois materiais foram muito similares, tendo-se verificado maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário para todos os outros casos. Tal tendência deveu-se à maior densidade das partículas de calcário e à sua menor capacidade de absorção de água relativamente às partículas cerâmicas, que permitiu ao *grout* não perder tanta fluidez e apresentar uma melhor capacidade de penetração dos vazios existentes.

Outro factor que, possivelmente, contribuiu para o registo de maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário foi o menor volume de vazios resultante da retracção do *grout*. A diferença entre o fenómeno de retracção nas amostras dos dois materiais deve-se, fundamentalmente, à retracção por dessecação do *grout*. Este tipo de retracção deve-se, principalmente, à evaporação e à absorção de água por outros elementos em contacto com o *grout*, sendo, neste caso, a estrutura sólida dos meios porosos a estar em contacto com a pasta de *grout*. A diferente capacidade de absorção das partículas constituintes das amostras dos materiais estudados origina diferentes quantidades de água absorvida, verificando-se uma maior retracção nos meios porosos constituídos por material cerâmico, provocando o aparecimento de um maior volume de vazios.

Relativamente à resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se que todos os valores registados nas amostras cerâmicas foram superiores aos registados nas amostras correspondentes de calcário (vd. quadros 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6). Esta superioridade dos valores de resistência à tracção por compressão diametral registados nas amostras cerâmicas deve-se, fundamentalmente, à melhor qualidade das ligações estabelecidas entre o *grout* e as partículas dos meios porosos deste material, relativamente às ligações estabelecidas entre o *grout* e as partículas dos meios porosos de calcário.

Em ambos os materiais, a tendência evidenciada pelas amostras secas aquando da injeção dos meios porosos D e E foi de um aumento da resistência mecânica ao longo da altura. No meio poroso C, verificou-se uma diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura, principalmente na amostra cerâmica seca. Tal tendência poderá ter-se devido à ocorrência de fenómenos de filtração e bloqueio à passagem do *grout* neste meio poroso. O aspecto visual apresentado pelas fatias do meio e do topo nesta amostra (vd. figuras 3.15 e 3.16) permitiu detectar a ocorrência dos fenómenos referidos.

Quanto às amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se uma tendência de diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura nas amostras de ambos os materiais e em todos os meios porosos. Este gradiente negativo apresentado pela resistência mecânica deveu-se, provavelmente, à ocorrência de fenómenos de sedimentação gravitacional das partículas sólidas do *grout*. A possível ocorrência destes fenómenos conduziu à existência de uma variação da concentração das partículas sólidas do *grout* ao longo da altura de injeção e, consequentemente, à diminuição da resistência mecânica da amostra nas zonas mais afastadas do local de injeção.

Em suma, é muito interessante constatar que, apesar de as velocidades ultra-sónicas registadas terem sido superiores nas amostras de calcário, as resistências à tracção por compressão diametral foram superiores nas amostras cerâmicas. Pode então inferir-se que, mais importante do que as massas volúmicas e resistências mecânicas de cada um dos diferentes materiais, o factor determinante para a resistência à tracção por compressão diametral de um meio poroso injectado por *grout* é a qualidade das ligações que este estabelece com as partículas do meio. Pode concluir-se que, apesar de a pressão de sucção exercida sobre o *grout* pelas partículas dos meios porosos ser superior nas amostras de calcário, a maior porosidade das partículas cerâmicas permite uma maior penetração do ligante (utilizado na composição do *grout* injectado) e proporciona, consequentemente, o estabelecimento de melhores ligações meio poroso/*grout*.

Este melhor comportamento mecânico das amostras cerâmicas poderá também estar relacionado, no caso do meio poroso C que contém partículas finas na sua composição, com a eventual ocorrência de reacções pozolânicas entre as suas partículas e o *grout*.

4.3.4. Comparação entre amostras obtidas a partir de diferentes métodos de injeção

Tal como sucedido com os tomogramas relativos às amostras dos dois diferentes materiais, procedeu-se à análise e comparação dos tomogramas relativos às amostras cerâmicas obtidas segundo os dois diferentes métodos de injeção de *grout* abordados ao longo do presente texto (vd. figuras 1.3 e 3.20). Começando pelas amostras do meio poroso C seco aquando da injeção, os tomogramas obtidos nas amostras relativas aos dois diferentes métodos de injeção apresentam-se na figura 4.41. Tal como referido em 3.5, a utilização da camada descontínua no processo de injeção parece ter contribuído para uma maior homogeneização da injeção ao longo da altura das amostras. Como se pode observar, as imagens relativas à amostra injectada com recurso a uma camada descontínua apresentam uma menor variação entre as diferentes fatias do que o ocorrido na amostra injectada sem utilização de camada descontínua.

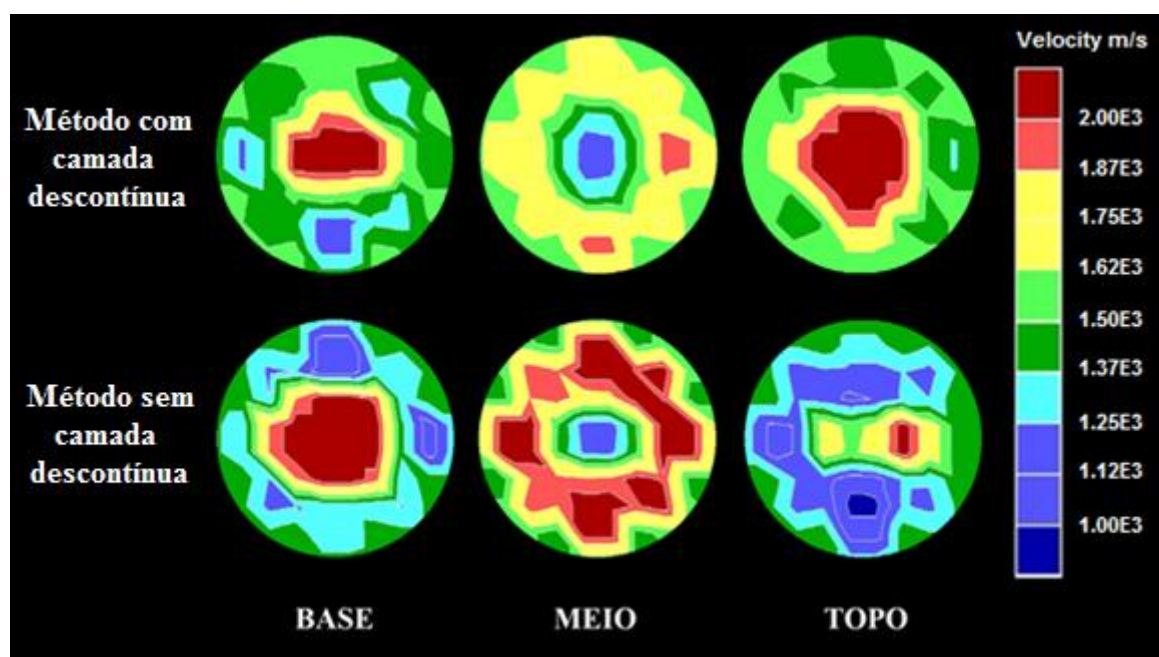


Figura 4.41 - Meio poroso C, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção

Quanto às amostras pré-molhadas do meio poroso C, os tomogramas obtidos encontram-se na figura 4.42. Neste caso, além da maior homogeneidade da injeção ao longo da altura na amostra injectada com recurso a camada descontínua, verificou-se também a existência de maiores velocidades ultra-sónicas nesta amostra relativamente ao ocorrido na amostra injectada sem a utilização de uma camada descontínua.

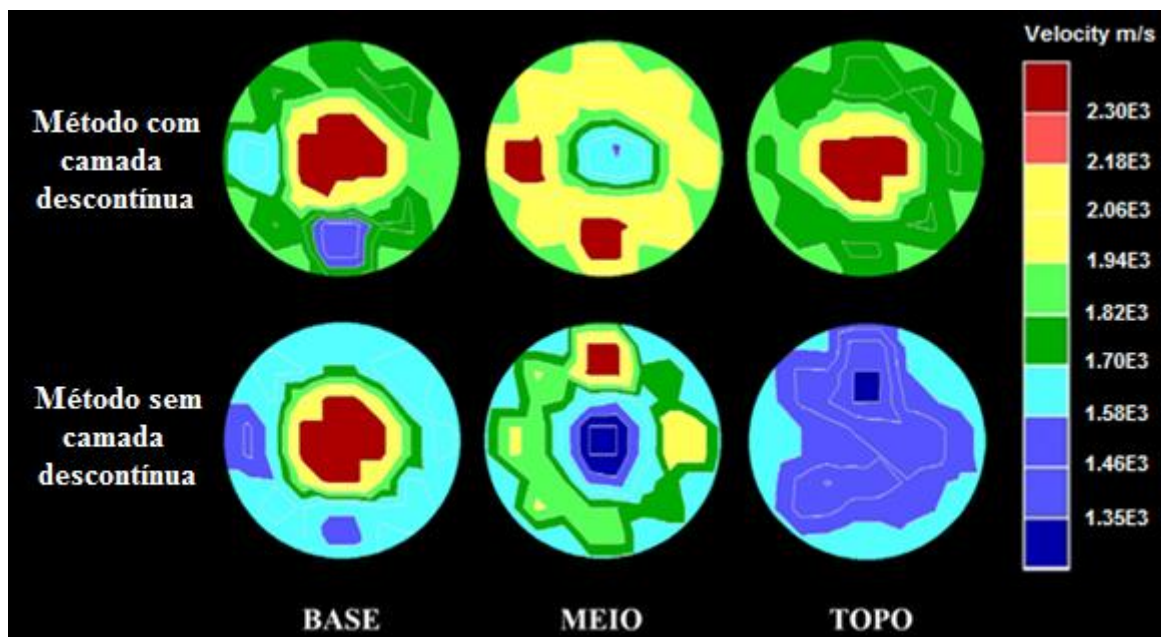


Figura 4.42 - Meio poroso C, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção

Quanto às amostras do meio poroso D (quer nas que se encontravam secas aquando da injeção, quer nas pré-molhadas), a principal diferença evidenciada pelos tomogramas, presentes nas figuras 4.43 e 4.44, foi a existência de maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras injectadas com recurso a uma camada descontínua relativamente ao ocorrido nas amostras injectadas sem a utilização de uma camada descontínua.

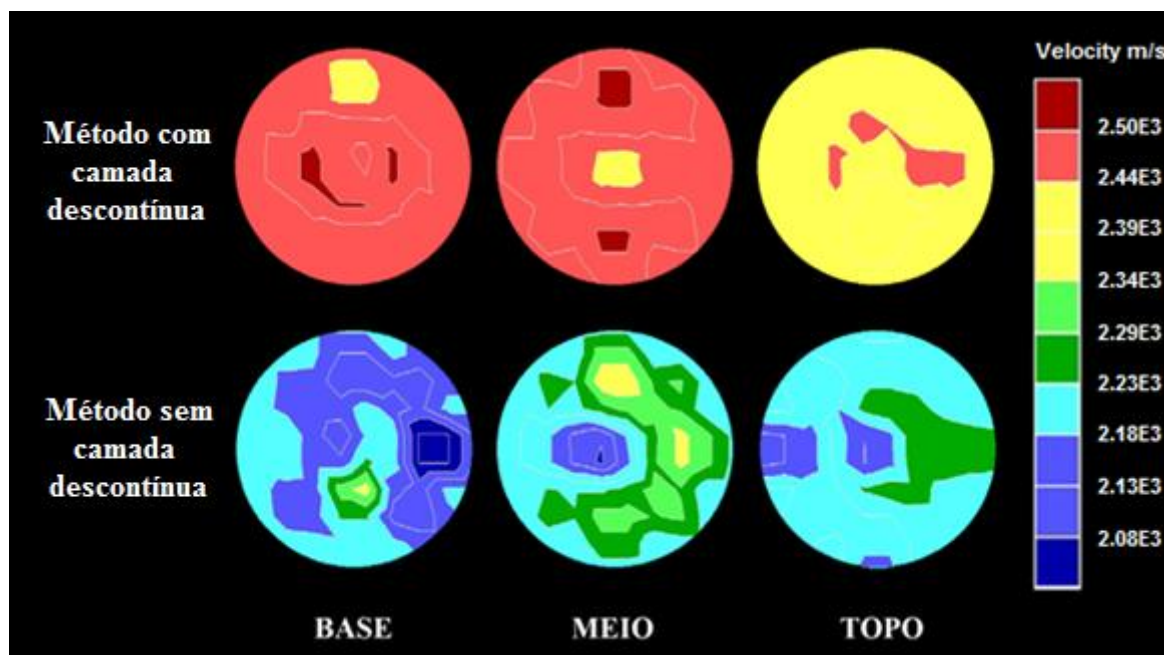


Figura 4.43 - Meio poroso D, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção

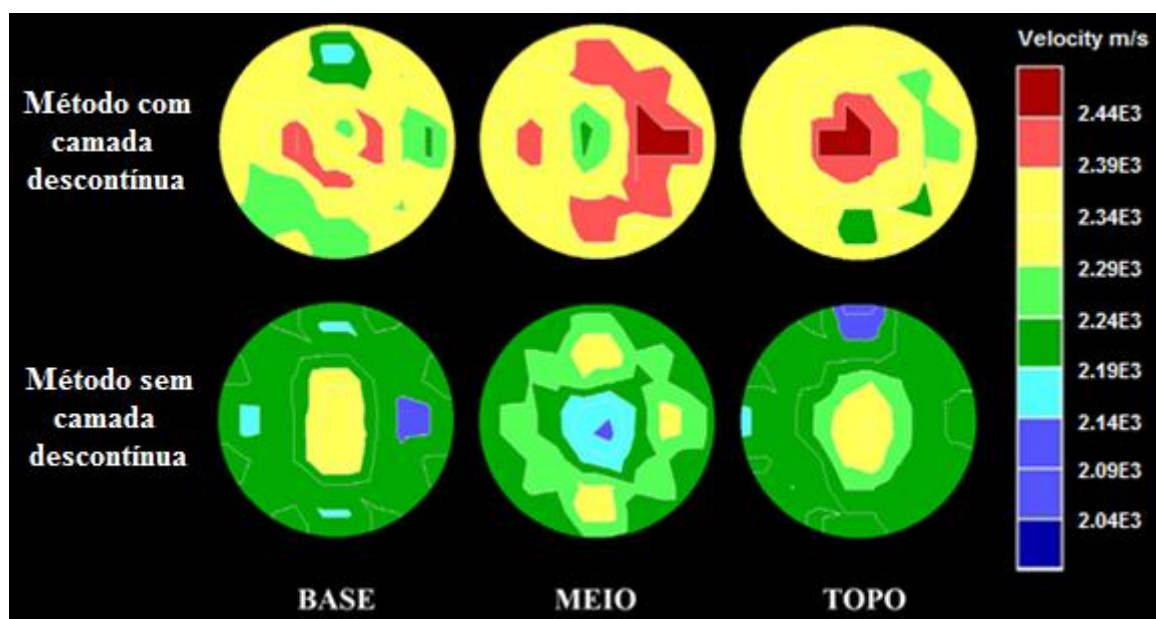


Figura 4.44 - Meio poroso D, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção

Relativamente às amostras do meio poroso E que se encontravam secas aquando da sua injeção, os tomogramas respeitantes aos dois diferentes métodos de injeção encontram-se na figura 4.45. Neste caso, os tomogramas não evidenciam diferenças significativas resultantes da utilização de uma camada descontinua no processo de injeção, sendo as imagens das duas amostras muito semelhantes entre si.

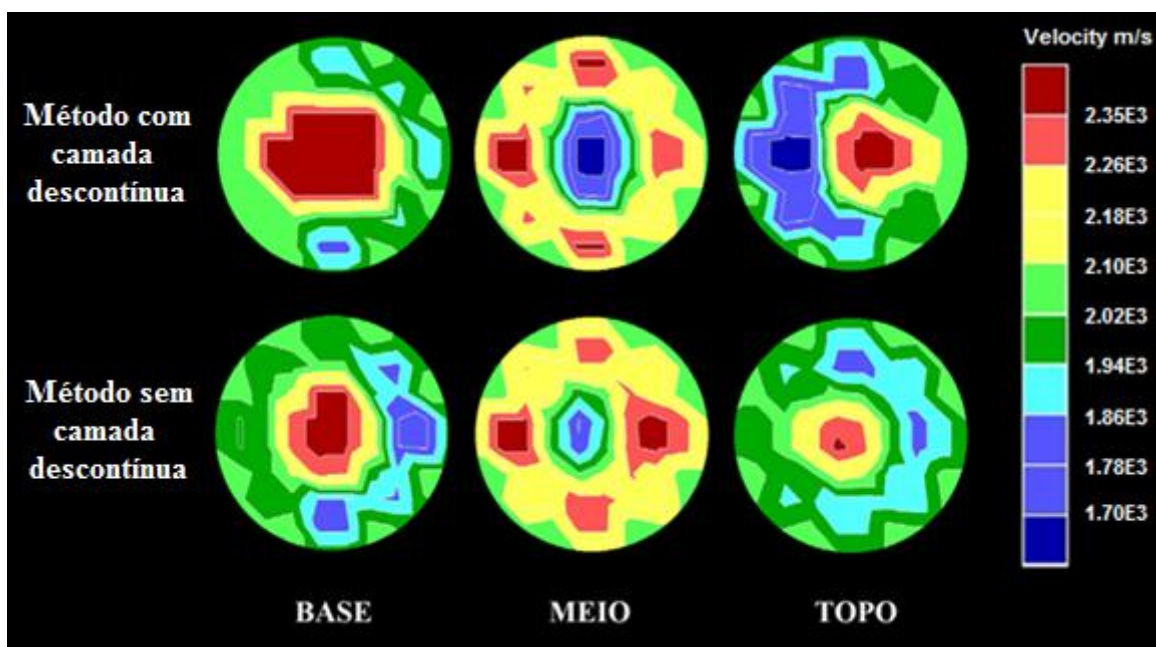


Figura 4.45 - Meio poroso E, seco: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injeção

Finalmente, os tomogramas das amostras do meio poroso E pré-molhadas apresentam-se na figura 4.46. Como é possível constatar, a utilização de uma camada descontinua no processo de

injecção contribuiu para a obtenção de maiores velocidades ultra-sónicas como parece também ter contribuído para a obtenção de uma maior homogeneidade da injecção ao longo da altura.

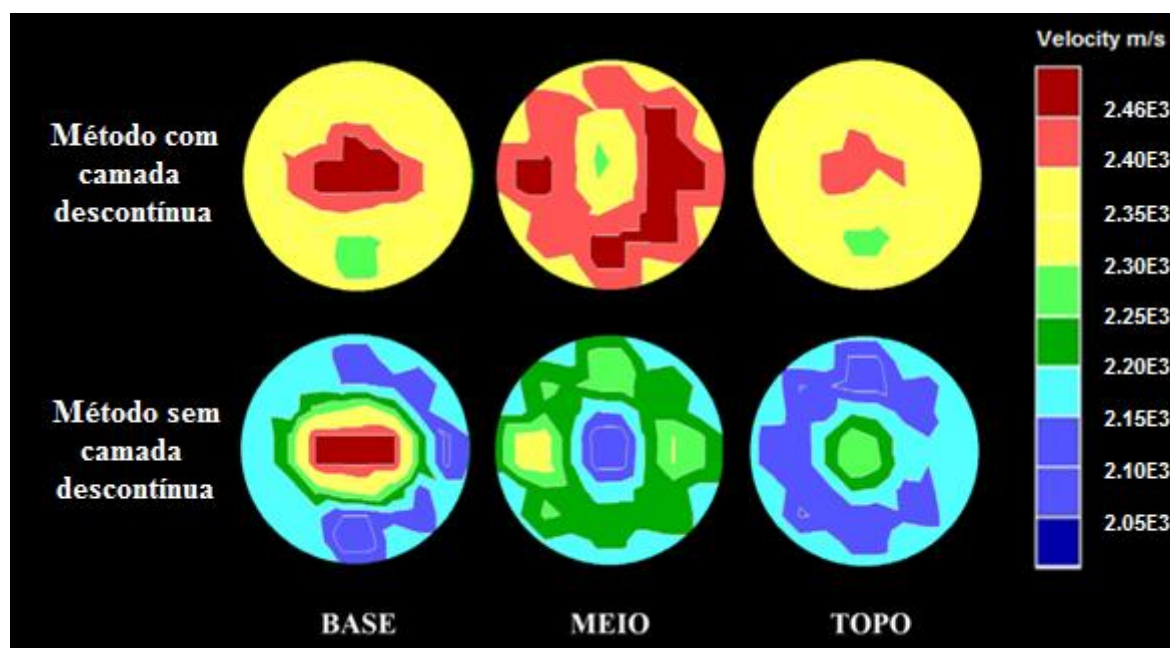


Figura 4.46 - Meio poroso E, pré-molhado: tomogramas representativos da evolução em altura das velocidades ultra-sónicas nas amostras cerâmicas obtidas segundo dois diferentes métodos de injecção

Quanto à influência nos resultados dos ensaios mecânicos provocada pela utilização de uma camada descontinua sob a base das amostras no processo de injecção parece ter existido uma contribuição para a obtenção de maiores valores de resistências à tracção por compressão diametral nos meios porosos sem partículas finas na sua composição (D e E, vd. quadros 3.9 e 3.10). No meio poroso C, a utilização da camada descontinua na injecção apenas contribuiu para a homogeneização da resistência mecânica das amostras ao longo da sua altura. Esta menor variabilidade da resistência mecânica ao longo da altura das amostras referentes ao meio poroso C atingiu-se, fundamentalmente, através da minimização da obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout*. Desta forma, a turbulência existente junto à zona de injecção destas amostras foi substancialmente reduzida, contribuindo assim para uma maior homogeneização do escoamento de *grout*. Esta maior homogeneização do escoamento de *grout* assumiu uma grande preponderância na melhoria dos resultados provenientes dos ensaios efectuados em meios porosos com partículas finas na sua composição. Pode dizer-se que esta melhoria do sistema de injecção constitui um avanço no sentido de reproduzir efectivamente a zona de entrada de uma injecção *in-situ*, uma vez que o sistema de injecção utilizado previamente (vd. figura 1.3) propiciava a ocorrência de fenómenos que não retratavam verdadeiramente a realidade de uma injecção nessa zona.

4.3.5. Alterações no procedimento iterativo

Numa última análise, procedeu-se à alteração de algumas das definições do procedimento iterativo de tratamento dos dados relativos às medições das velocidades ultra-sónicas efectuadas nas amostras, no sentido de compreender a sua influência nos tomogramas obtidos. Definiram-se como objecto de estudo para este ponto as amostras do meio poroso C que se encontravam secas aquando da injeção dos dois materiais.

No separador *Inversion Parameters* (vd. figura 4.10) alterou-se a definição dos raios das curvas (*Curve Rays*) de *Bending* para *Hybrid*. Esta alteração é sugerida pelo *software* como forma de proporcionar que os caminhos assumidos ao longo do procedimento de iteração correspondam aos caminhos mais rápidos entre cada par de pontos. No entanto, após efectuada esta alteração não foram detectadas alterações nos tomogramas obtidos anteriormente, de modo que, aparentemente, o procedimento iterativo anteriormente efectuado teria já assumido as velocidades entre cada par de pontos como sendo as correspondentes aos menores tempos registados entre os pontos. Desta forma, decidiu manter-se a definição *Curve Rays by Bending*, tal como já tinha sido efectuado para a obtenção dos tomogramas anteriormente apresentados no texto.

Posteriormente, procedeu-se à alteração do modo de actualização do modelo durante o procedimento iterativo. Tendo, até aqui, sido sempre utilizada uma actualização aditiva do modelo, obtiveram-se, nesta fase, os tomogramas das amostras segundo uma actualização multiplicativa do modelo durante o procedimento iterativo. Desta vez, registaram-se diferenças significativas relativamente à definição até então utilizada. Como é possível observar através das figuras 4.47 e 4.48, a utilização de diferentes modos de actualização do modelo durante o procedimento iterativo originou a obtenção de tomogramas significativamente diferentes.

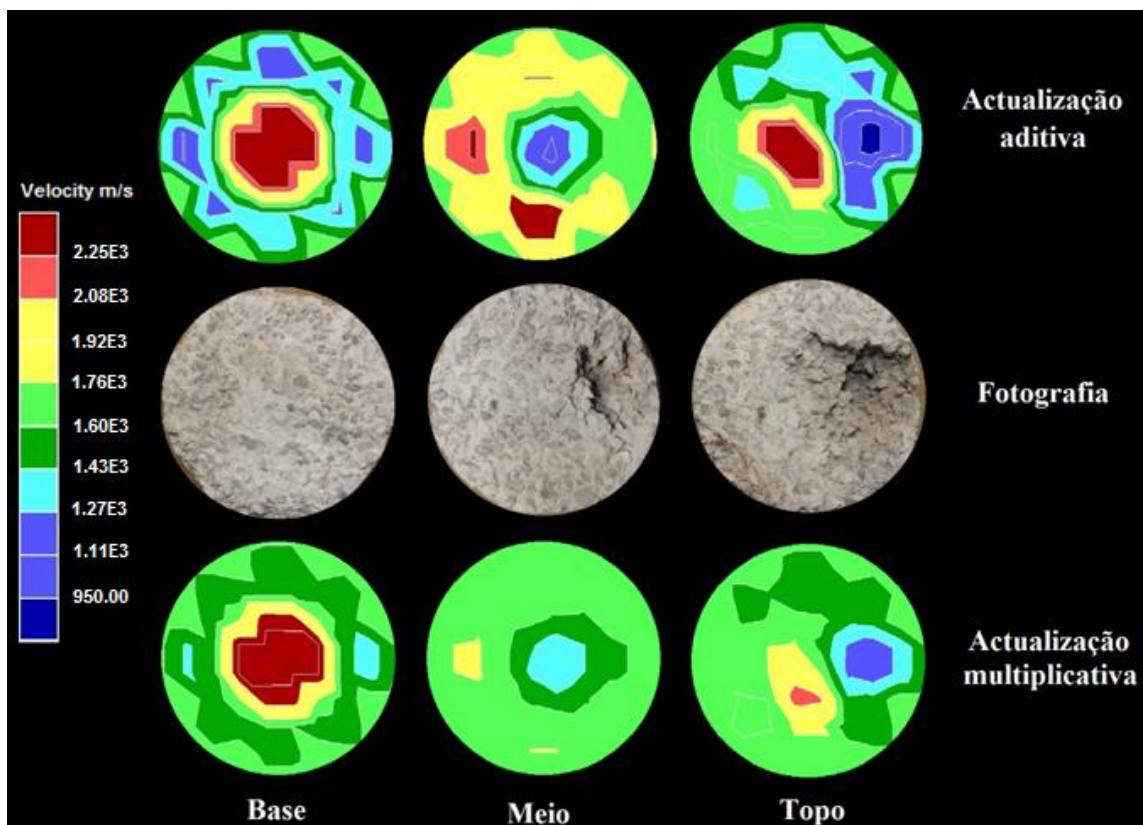


Figura 4.47 - Meio poroso C: tomogramas e fotografias representativas da evolução em altura das velocidades ultrasónicas na amostra seca de calcário segundo dois diferentes tipos de actualização do procedimento iterativo

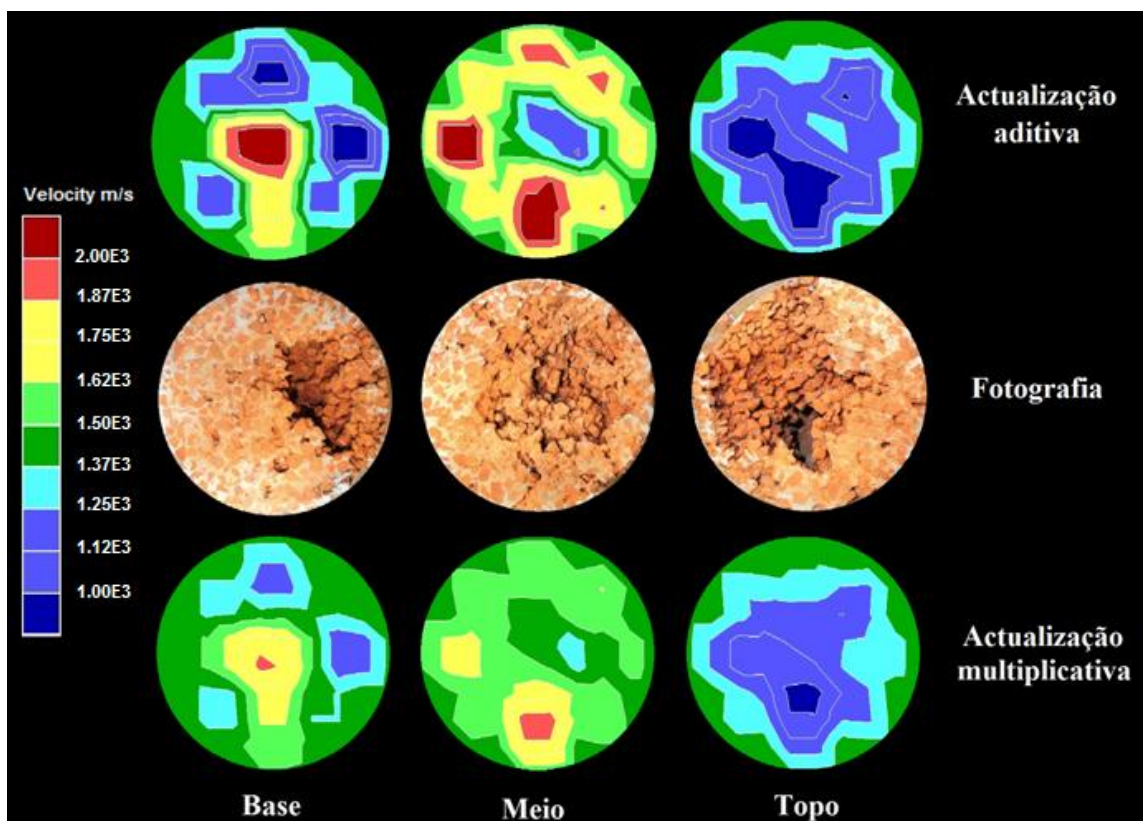


Figura 4.48 - Meio poroso C: tomogramas e fotografias representativas da evolução em altura das velocidades ultrasónicas na amostra cerâmica seca segundo dois diferentes tipos de actualização do procedimento iterativo

Em ambos os materiais, os tomogramas evidenciam a existência de uma definição mais pormenorizada da distribuição das velocidades ultra-sónicas através da utilização da actualização aditiva do modelo durante o procedimento iterativo. De forma simplificada, as imagens obtidas com recurso a este tipo de actualização do modelo apresentam não apenas uma maior amplitude dos valores de velocidades ultra-sónicas nos planos das amostras, como também uma maior semelhança com as fotografias tiradas aos respectivos planos. Os tomogramas obtidos segundo actualizações multiplicativas do modelo durante o procedimento iterativo não permitem aferir com tanta precisão a existência de zonas de menor compacidade (com menores velocidades ultra-sónicas) e, desta forma, não constituem a melhor solução para avaliações da morfologia interna de uma alvenaria após a sua injeção com *grout*. Os dados apresentados permitem inferir a melhor capacidade de avaliação da técnica de injeção de *grout* em alvenarias antigas através da actualização aditiva do modelo durante o procedimento iterativo.

Finalmente, importa referir que a utilização da técnica RAYPT (*Ray-projection technique*), disponível no separador *Inversion Parameters*, é apenas indicada em situações onde se pretenda aferir a presença de anomalias num material de fundo uniforme. No presente trabalho, recorreu-se à utilização da técnica SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*), uma vez que as amostras em estudo, devido à sua composição heterogénea, não apresentavam características adequadas para a utilização da técnica RAYPT.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Finalizados os diferentes estudos realizados ao longo do presente trabalho, foi possível retirar conclusões sobre os resultados obtidos.

Relativamente ao estudo de propagação de ondas ultra-sónicas (vd. 2), foi possível constatar que, para além de as maiores velocidades ultra-sónicas terem ocorrido com um sinal emitido de 500V, este foi também o melhor valor de sinal estudado para a diminuição da extensão do *campo próximo*. De acordo com o referido em 2.4, a detecção de descontinuidades num meio submetido a propagação ultra-sónica não é possível de realizar de uma forma fiável na região do *campo próximo*. Ora, segundo a definição do *campo próximo*, a sua extensão apresenta uma variação inversa à da velocidade de propagação ultra-sónica. Visto que as maiores velocidades foram registadas com um sinal emitido de 500V e que tanto a frequência como o diâmetro dos transdutores não variaram, pôde concluir-se que o mais benéfico, para efeitos de tomografia ultra-sónica, passa pela utilização de um sinal emitido de 500V.

No que respeita à avaliação da utilização do ensaio de velocidade de propagação ultra-sons realizada em 3, verificou-se que, quando não complementada pela técnica de tomografia ultra-sónica, constitui uma solução limitada no sentido de avaliar a técnica de injeção de *grout* em alvenarias antigas. Principalmente em meios porosos com partículas finas na sua composição (exemplo do meio poroso C estudado), onde a injeção tende a ser mais heterogénea, constatou-se a incapacidade do ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons avaliar de forma detalhada a morfologia interna numa alvenaria injectada. Em particular, a presença de vazios no interior das alvenarias após a sua injeção com *grout* não foi possível de identificar através das velocidades médias registadas em cada fatia. Esta técnica de ensaio utilizada de forma isolada não permite identificar as zonas do interior de uma alvenaria que apresentam menores velocidades de propagação de ultra-sons, as quais correspondem na realidade a zonas menos compactas que poderão comprometer o comportamento mecânico da alvenaria. Sem a descrição detalhada da distribuição das velocidades de propagação de ultra-sons (proporcionada pela tomografia ultra-sónica) no interior de uma alvenaria injectada com *grout* torna-se impossível identificar e compreender todos os fenómenos ocorridos, carecendo esta técnica de rigor para a avaliação da eficiência da injeção.

No entanto, nos meios porosos sem partículas finas na sua composição (no presente trabalho os meios porosos D e E) verificou-se que a técnica de ensaio de velocidade de ultra-sons permite avaliar de forma satisfatória a qualidade das injeções de *grout* bem como prever o seu comportamento mecânico, como foi possível compreender através da comparação dos resultados obtidos no ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons com os obtidos no ensaio de resistência à tracção por compressão diametral. Nestes casos, a maior homogeneidade das injeções não provocou o aparecimento de vazios de dimensões significativas no interior das amostras e, como tal, a avaliação

da sua morfologia interna foi possível de realizar apenas com recurso ao ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons de forma fiável.

Relativamente ao estudo efectuado sobre tomografia ultra-sónica (vd. 4), constatou-se a confirmação gráfica da maioria das observações previamente enunciadas em 3 (principalmente no que respeita aos meios porosos D e E) e foi possível retirar diversas conclusões sobre as injeções de *grout* nos diferentes meios porosos. Verificou-se igualmente a existência de uma grande semelhança entre os tomogramas obtidos e as correspondentes fotografias das amostras nos planos localizados à altura dos tomogramas. Tal sugere que a utilização de tomografia ultra-sónica como método de avaliação não destrutivo da qualidade de injeções de *grout* em alvenarias com constituição semelhante à estudada no presente trabalho constitui uma ferramenta bastante valiosa e fiável.

Quanto à avaliação das injeções nos diferentes meios porosos verificou-se, no que diz respeito a velocidades ultra-sónicas, uma tendência do seu aumento ao longo da altura das amostras que se encontravam secas aquando da injeção. Apenas na amostra cerâmica seca respeitante ao meio poroso C se verificou uma diminuição significativa das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura. A tendência particular desta amostra parece ter-se devido à existência de bloqueios do meio poroso à passagem do *grout*, que resultou no aspecto pouco compacto evidenciado pelas fatias do meio e do topo nesta amostra, como se pode observar nas figuras 3.15 e 3.16.

Quanto às amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se globalmente uma tendência de diminuição das velocidades ultra-sónicas ao longo da altura das amostras, em ambos os materiais.

Comparando os valores das velocidades ultra-sónicas obtidas nas amostras pré-molhadas dos três meios porosos ensaiados em ambos os materiais, pôde concluir-se que as maiores velocidades foram registadas no meio poroso E, seguido dos meios D e C, respectivamente. No caso do calcário, a ordem de velocidades ultra-sónicas entre os três meios porosos referida foi igualmente válida para as amostras secas aquando da injeção. Apenas no caso das amostras cerâmicas secas se verificou o registo de maiores velocidades ultra-sónicas no meio poroso D, seguido dos meios E e C, respectivamente. Como seria expectável, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras do meio poroso C foram, para ambos os materiais e para ambos os estados (seco e molhado) das amostras aquando da injeção, mais baixas do que nos meios porosos D e E. A presença de partículas finas na composição do meio poroso C originou uma maior dificuldade de penetração do *grout* e conduziu a que as suas amostras apresentassem, após a injeção, um volume de vazios superior ao ocorrido nos restantes casos e, consequentemente, menores velocidades ultra-sónicas.

Verificou-se também que, a pré-molhagem das amostras influenciou de forma distinta as velocidades ultra-sónicas registadas nos meios porosos dos dois materiais. Nas amostras de calcário, os meios porosos D e E apresentaram maiores valores de velocidade ultra-sónica no caso das amostras que se encontravam secas aquando da injeção. Por sua vez, as amostras cerâmicas destes meios apresentaram maiores valores de velocidades ultra-sónicas no caso das amostras sujeitas a pré-molhagem. A pré-molhagem destas amostras proporcionou uma injeção mais eficiente, que se

traduziu no registo de valores mais elevados de velocidades ultra-sónicas. Esta diferente variação nas amostras dos dois materiais pode ter-se devido à maior capacidade de absorção de água por parte das partículas cerâmicas que, consequentemente, originou uma menor quantidade de água existente entre as partículas dos meios porosos deste material após a sua molhagem relativamente ao ocorrido no caso das amostras de calcário (vd. quadro 2.1).

Dessa forma, o “espaço” disponível para ser preenchido por *grout* na zona interparticular foi também superior nas amostras cerâmicas pré-molhadas do que nas amostras pré-molhadas de calcário e conduziu a que, após o processo de cura das amostras injectadas, o volume de vazios (resultante da evaporação da água livre retida no espaço interparticular) existente entre as partículas fosse superior nas amostras pré-molhadas de calcário relativamente ao ocorrido nas amostras cerâmicas pré-molhadas. Desta maior porosidade do espaço interparticular resultou o registo de menores velocidades ultra-sónicas nas amostras pré-molhadas de calcário relativamente ao ocorrido nas amostras secas.

Quanto ao meio poroso C, o efeito da pré-molhagem foi igualmente distinto nos dois materiais. Enquanto nas amostras de calcário a pré-molhagem permitiu a obtenção de maiores valores de velocidades ultra-sónicas, nas amostras cerâmicas a pré-molhagem traduziu-se numa diminuição dos valores de velocidade ultra-sónica registados. Pode dizer-se que, no meio poroso C, a pré-molhagem das amostras permite uma melhor penetrabilidade do *grout* nas amostras de calcário e constitui um factor adverso à penetração do *grout* nas amostras cerâmicas. Sendo que, o efeito associado à pré-molhagem nas amostras cerâmicas ocorre, possivelmente, devido à grande capacidade de absorção de água por parte das suas partículas, que impossibilita a penetração do *grout* nos poros onde está presente a água (especialmente nos poros de menor dimensão que apresentam maior pressão capilar de sucção) originando posteriormente o aparecimento de um maior volume de vazios após o processo de cura e conduz à obtenção de menores velocidades ultra-sónicas.

Comparando os valores das velocidades ultra-sónicas registadas nos dois materiais, verificou-se que, globalmente, as velocidades ultra-sónicas registadas nas amostras de calcário foram superiores às registadas nas amostras cerâmicas. O único caso em que tal não sucedeu foi nas amostras secas do meio poroso C, onde as velocidades registadas nos dois materiais foram muito similares, tendo-se verificado maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário para todos os outros casos.

Outro factor que, possivelmente, contribuiu para o registo de maiores velocidades ultra-sónicas nas amostras de calcário foi o menor volume de vazios resultante da retracção do *grout* nessas amostras. A diferença entre o fenómeno de retracção nas amostras dos dois materiais deve-se, fundamentalmente, à retracção por dessecação do *grout*. Este tipo de retracção deve-se, principalmente, à evaporação e à absorção de água por outros elementos em contacto com o *grout*, sendo, neste caso, a estrutura sólida dos meios porosos a estar em contacto com a pasta de *grout*. A diferente capacidade de absorção das partículas constituintes das amostras dos materiais estudados origina diferentes quantidades de água absorvida, verificando-se uma maior retracção nos meios porosos constituídos por material cerâmico, causando o aparecimento de um maior volume de vazios.

Relativamente à resistência à tracção por compressão diametral, verificou-se que todos os valores registados nas amostras cerâmicas foram superiores aos registados nas amostras correspondentes de calcário. Esta superioridade dos valores de resistência à tracção por compressão diametral registados nas amostras cerâmicas deve-se, fundamentalmente, à melhor qualidade das ligações estabelecidas entre o *grout* e as partículas dos meios porosos deste material relativamente às ligações estabelecidas entre o *grout* e as partículas dos meios porosos de calcário.

Em ambos os materiais, a tendência evidenciada pelas amostras secas aquando da injeção dos meios porosos D e E foi de um aumento da resistência mecânica ao longo da altura. No meio poroso C, verificou-se uma diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura, principalmente na amostra cerâmica seca. Tal tendência poderá ter-se devido à ocorrência de fenómenos de filtração e bloqueio à passagem do *grout* neste meio poroso. O aspecto visual apresentado pelas fatias do meio e do topo nesta amostra (vd. figuras 3.15 e 3.16) denunciou, de resto, a ocorrência dos fenómenos referidos.

Quanto às amostras sujeitas a pré-molhagem, verificou-se uma tendência de diminuição da resistência à tracção por compressão diametral ao longo da altura nas amostras de ambos os materiais e em todos os meios porosos. Este gradiente negativo apresentado pela resistência mecânica deveu-se, provavelmente, à ocorrência de fenómenos de sedimentação gravitacional das partículas sólidas da pasta de *grout*. A possível ocorrência destes fenómenos pode ter conduzido à existência de uma variação ao longo da altura de injeção, da concentração das partículas sólidas do *grout* e, consequentemente, à diminuição da resistência mecânica da amostra nas zonas mais afastadas do local de injeção.

Concluiu-se também que os maiores valores de resistência à tracção por compressão diametral foram registados nas amostras do meio poroso E, seguido dos meios porosos D e C, respectivamente. Esta hierarquia de resistências à tracção por compressão diametral nos diferentes meios porosos foi evidenciada quer no caso seco, quer no caso de pré-molhagem das amostras.

Quanto à utilização de um método alternativo de injeção, nomeadamente com a utilização de uma camada descontínua sob a base das amostras, verificou-se a obtenção de maiores valores de resistências à tracção por compressão diametral nos meios porosos sem partículas finas na sua composição (D e E). No meio poroso C, a utilização da camada descontínua na injeção apenas contribuiu para a homogeneização da resistência mecânica das amostras ao longo da sua altura. Esta menor variabilidade da resistência mecânica ao longo da altura das amostras referentes ao meio poroso C atingiu-se, fundamentalmente, através da minimização da obstrução por parte do meio poroso à passagem do *grout*. Desta forma, a turbulência existente junto à zona de injeção destas amostras foi substancialmente reduzida, contribuindo assim para uma maior homogeneização do escoamento de *grout*. Esta maior homogeneização do escoamento de *grout* assumiu uma grande preponderância na melhoria dos resultados provenientes dos ensaios efectuados em meios porosos com partículas finas na sua composição. Pode dizer-se que esta melhoria do sistema de injeção constitui um avanço no

sentido de reproduzir efectivamente a zona de entrada de uma injeção *in-situ*, uma vez que o sistema de injeção utilizado previamente (vd. figura 1.3) propiciava a ocorrência de fenómenos que não retratavam verdadeiramente a realidade de injeção nessa zona.

Constatou-se igualmente que as definições do procedimento iterativo utilizadas no presente trabalho (vd. figura 4.10) foram as que mais se adequam à análise tomográfica da qualidade de injeções de *grout* em alvenarias antigas.

Além de ter permitido a obtenção de diversas conclusões, o presente trabalho pode servir de lançamento para trabalhos futuros na temática da avaliação não destrutiva da injeção de *grouts*.

Relativamente aos materiais estudados no presente trabalho (calcário e cerâmica), crê-se que fazem parte da constituição de uma quantidade considerável de alvenarias antigas que podem ser alvo de aplicação da técnica de injeção de *grouts*. No entanto, quaisquer outros materiais que sejam identificados na constituição de alvenarias antigas podem constituir uma variante ao presente trabalho a fim de aferir igualmente as suas características e o modo como estas podem influenciar a eficiência da injeção de *grouts* nesses tipos de alvenarias.

Quanto à constituição do *grout* injectado, os resultados obtidos poderão servir de comparação ou orientação para a realização de trabalhos com a utilização de *grouts* com diferentes composições, particularmente no que respeita à relação água/ligante, ao tipo de superplastificante e à sua quantidade utilizada, como também a possíveis adições de sílica de fumo ou cinzas volantes.

No que respeita aos modelos utilizados para simular alvenarias antigas, os resultados obtidos no presente trabalho poderão fornecer informações que permitam, futuramente, a sua alteração ou adaptação a situações específicas de aplicação da técnica de injeção de *grout*, de modo a retratar com maior fiabilidade as condições de injeção *in-situ*.

Outro tipo de seguimento possível para o trabalho realizado está relacionado com o método de injeção. Verificou-se que a simples utilização de uma camada descontínua sob a base das amostras proporcionou diferenças significativas nos resultados obtidos. Esta pequena variação no método de injeção, bem como os seus efeitos nos resultados obtidos, podem servir, futuramente, de sustentação ao desenvolvimento de métodos de injeção inovadores e mais eficientes.

O ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons realizado neste trabalho proporcionou a obtenção de ideias elucidativas sobre esta técnica de ensaio não destrutiva, que poderão ser utilizados como ponto de partida para a exploração de diferentes aspectos e particularidades do ensaio, bem como para a sua aplicação de forma mais segura e objectiva.

Ao nível das malhas de pontos utilizadas nos ensaios de ultra-sons, diferentes configurações poderão ser estudadas e desenvolvidas com vista ao aperfeiçoamento e adaptabilidade do ensaio quer às circunstâncias de injeção e avaliação da injeção *in-situ*, quer ao *software* de tomografia ultra-sónica utilizado.

Igualmente passível de desenvolvimentos futuros poderá ser a metodologia seguida na avaliação da injeção de *grouts* com recurso a tomografia ultra-sónica. Além das possíveis alterações relativamente às malhas, poderão ser estudados diferentes *softwares* de processamento de dados, bem como diferentes procedimentos iterativos a fim de poder compará-los com os utilizados no presente trabalho e retirar conclusões quanto às condições ideais de aplicação de cada *software* ou procedimento iterativo.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. C496/C496M-04, United States, ASTM, 2004.
- [2] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) - *Standard Test Method for Pulse Velocity Through concrete*. C597-02, United States, ASTM, 2002.
- [3] - ANDREUCCI, Ricardo. *Ensaio por ultrassom*. Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção, 2011. www.abendi.org.br (30/10/2013).
- [4] - ANZANI, A. *et. al.* - *Evaluation of the repair on multiple leaf stone masonry by acoustic emission*. Materials and Structures, Volume 41 (2008), págs. 1169-1189, 2008.
- [5] - ANZANI, A. *et. al.* - *Use of Sonic and GPR Tests to Control the Effectiveness of Grout Injections of Stone Masonry*. Politecnico di Milano, Milano, Italy, 2006.
- [6] - AXELSSON, M.; GUSTAFSON, G.; FRANSSON, Å. - *Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratios*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 24, págs. 390-397, 2009.
- [7] - BINDA, L. *et. al.* - *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto*. Construction and Building Materials, Volume 17, págs. 629-639, 2003.
- [8] - BINDA, L. *et. al.* - *Sonic tomography and flat-jack tests as complementary investigation procedures for the stone pillars of the temple of S. Nicolo l'Arena (Italy)*. NDT & E Internacional, Volume 36, págs. 215-227, 2003.
- [9] - BINDA, L. *et. al.* - *Application of sonic tests to the diagnosis of damaged and repaired structures*. NDT & E Internacional, Volume 34, págs. 123-138, 2001.
- [10] - BINDA, L. *et. al.* - *Non-Destructive Testing Techniques Applied for Diagnostic Investigation: Syracuse Cathedral in Sicily, Italy*. International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration, Volume 1, págs. 380-402, 2007.
- [11] - BINDA, L.; SAISI, A. - *State of the Art of Research on Historic Structures in Italy*. Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy, 2001.
- [12] - BINDA, L.; SAISI, A. - *Knowledge of the building, on site investigation and connected problems*. Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, págs. 213-224, Italy, 2009.
- [13] - BINDA, L.; SAISI, A. - *Application of NDTs to the diagnosis of Historic Structures*. NDTCE'09, Non Destructive Testing in civil engineering, Nantes, France, 2009.
- [14] - BRAS, A.; HENRIQUES, Fernando M.A. - *Natural hydraulic lime based grouts - The selection of grout injection parameters for masonry consolidation*. Construction and Building Materials, Volume 26, págs. 135-144, 2012.

- [15] - CAMPLANI, M. *et. al.* - *Acoustic Tomography for Non Destructive Testing of Stone Masonry*. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2008, págs. 596-605, 2008.
- [16] - CONCU, G. *et. al.* - *Non-destructive testing on a stone masonry using acoustic attenuation tomography imaging*. Proceedings of the Twelfth Internacional Conferece on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing, Civil-Comp Press, Stirlingshire, 2009.
- [17] - EKLUND, D.; STILLE, H. - *Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts*. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 23, págs. 389 - 398, 2008.
- [18] - FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (FCT/UNL) – *Ficha de ensaio - Pedras naturais e artificiais. Velocidade de propagação do som*. FE 13, Lisboa, 1996.
- [19] - GALVÃO, J. - *Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas - Esclerómetro e ultra-sons*. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- [20] - JORNE, F. - *Comunicação Particular*. Departamento Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [21] - JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. – *Avaliação da técnica de injeção de grout recorrendo ao ensaio de ultra-sons e tomografia ultra-sónica*. Congresso Construção 2012, Coimbra, Portugal, 18-20 de Dezembro de 2012.
- [22] - JORNE, F.; HENRIQUES, F.; BALTAZAR, L. - *Grout injection in porous media with different internal structures*. Structural Faults & Repair 2012, Edimburgh. 3-5 de Julho de 2012.
- [23] - KINSLER, L. E. *et. al.* - *Fundamentals of Acoustics. Fourth edition*. New York, John Wiley and Sons, 1982.
- [24] - LEÓN Y LEÓN, C. A. - *New perspectives in mercury porosimetry*. Advances in Colloid and Interface Science , págs. 341-372, 1998.
- [25] - MARTIN, J. *et. al.* - *Ultrasonic tomography of grouted duct post-tensioned reinforced concrete bridge beams*. NDT & E Internacional, Volume 34, págs. 107-113, 2001.
- [26] - MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. - *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, IBRACON, 2008.
- [27] - OLIVEIRA, D. *et. al.* - *Strengthening of three-leaf stone masonry walls: an experimental research*. Materials and Structures, Volume 45, págs. 1259-1276, 2012.
- [28] - PORTO, F. *et. al.* – *Use of sonic tomography for the diagnosis and the control of intervention in historic masonry buildings*. Internacional Symposium – Non Destructive Testing in civil engineering, Germany, 2003.
- [29] - RIBEIRO, N. - *Caldas de injeção cimentícias para bainhas de pré-esforço – estudo da sua estabilidade*. Relatório de Projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

- [30] - SANTOS, Mário - *Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais*. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2004.
- [31] - SCHULLER, M. *et. al.* - *Acoustic Tomography for evaluation of unreinforced masonry*. Construction and Building Materials, Volume 11, págs. 199-204, 1997.
- [32] - SILVA, B. *et. al.* - *Assessment of the effectiveness of grout injection on the consolidation of 3-leaf stone masonry walls through the use of NDT and DT*. Structural Analysis of Historical Constructions, 2012 DWE, Wroclaw, Poland, 2012.
- [33] - VALLUZZI, M. *et. al.* - *Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions*. NDTCE'09, Non Destructive Testing in civil engineering, Nantes, France, 2009.
- [34] - VAN RICKSTAL, F. - *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*. Doctoral Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2000.
- [35] - YANES, E. *et. al.* - *The restoration of the parish church of San Dionisio in Jerez de la Frontera (Spain)*. Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, Poland, 2012.

Sites consultados

- [36] - <http://static4.olympus-ims.com/data/Image/near-field.jpg?rev=1DE4>. 28/01/2013.

ANEXOS

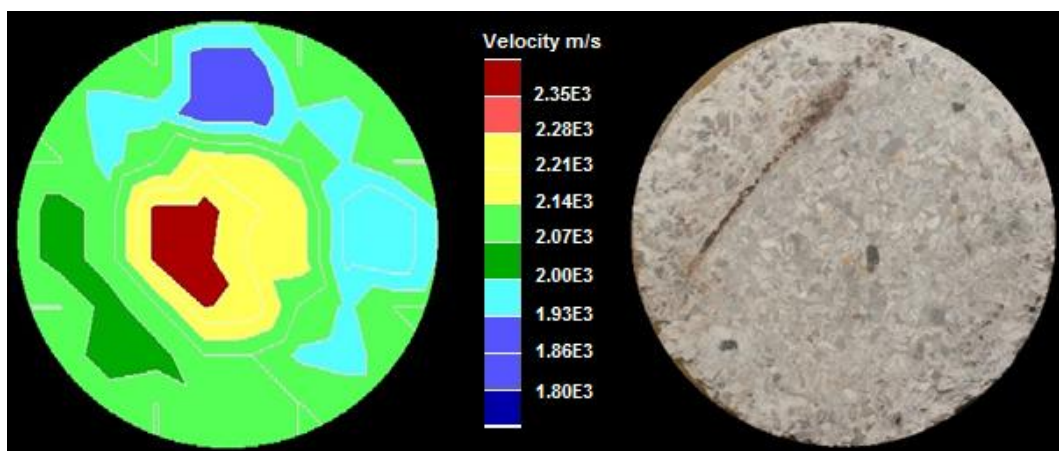


Figura A.1 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

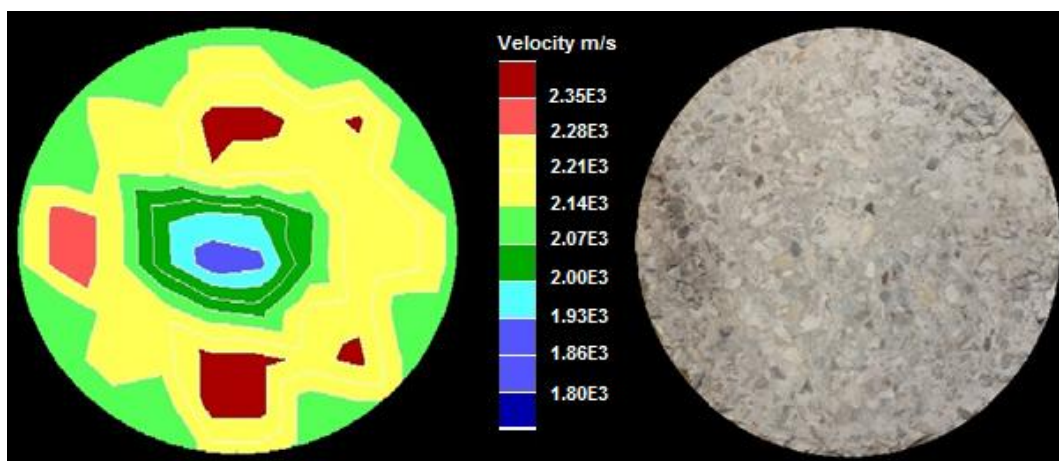


Figura A.2 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

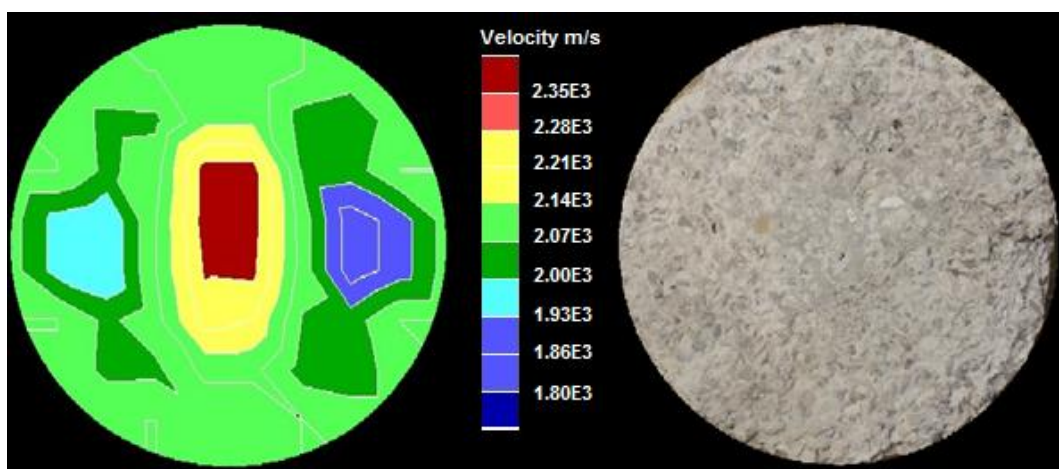


Figura A.3 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

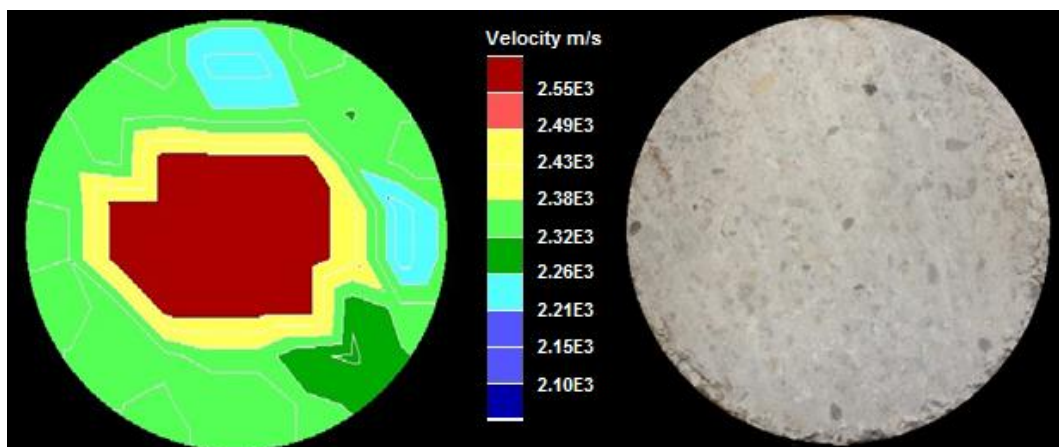


Figura A.4 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

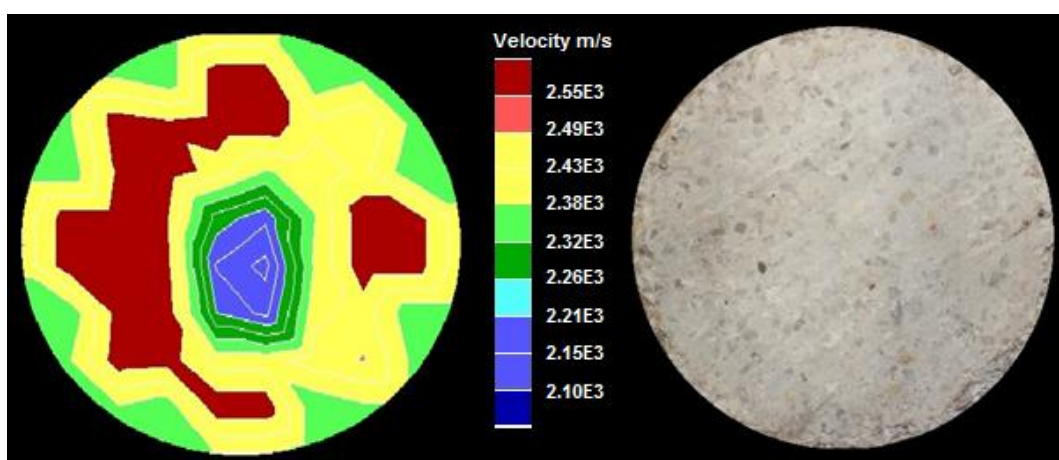


Figura A.5 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

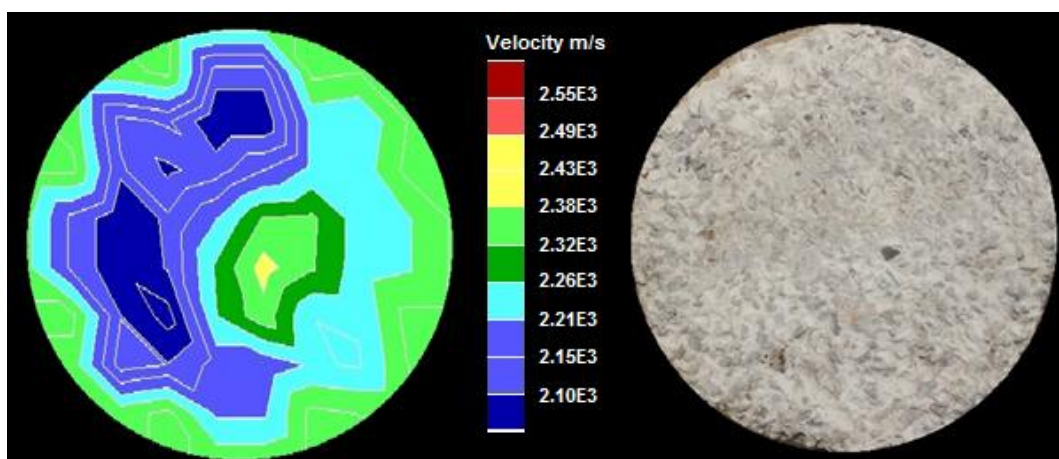


Figura A.6 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

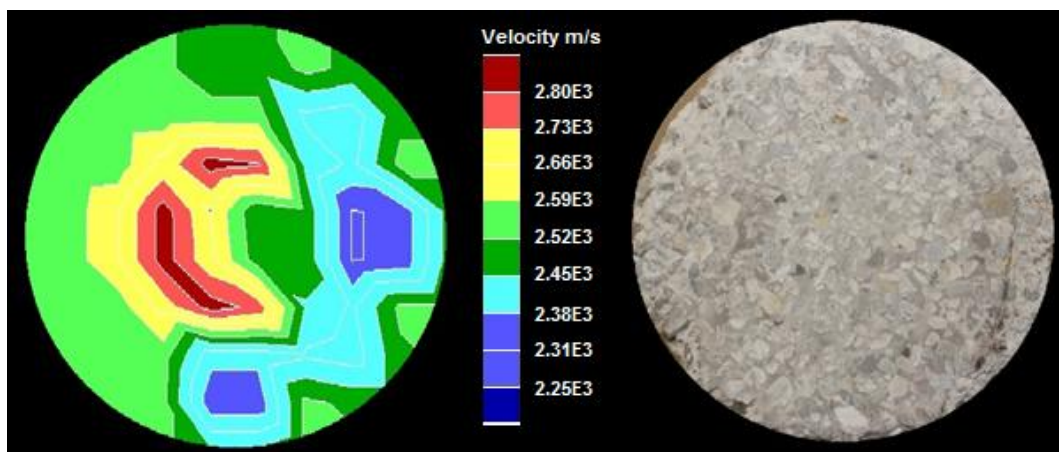


Figura A.7 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

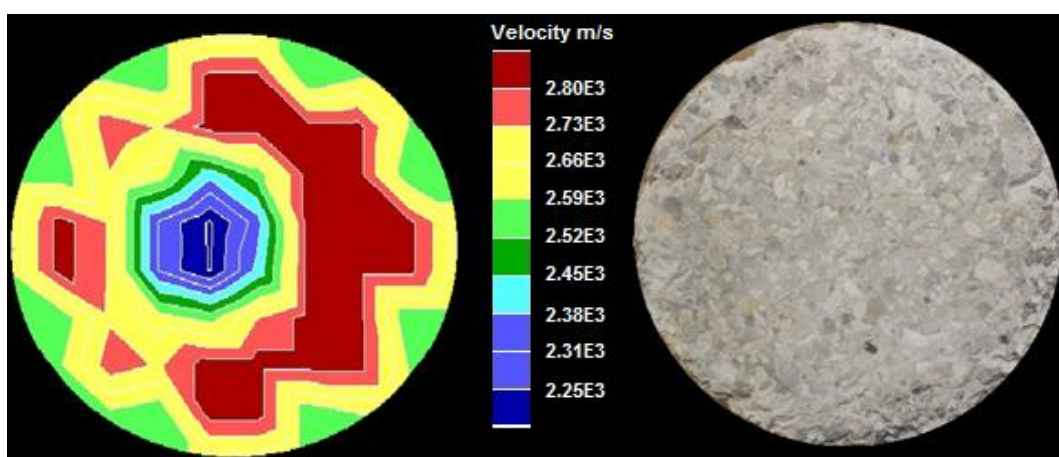


Figura A.8 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

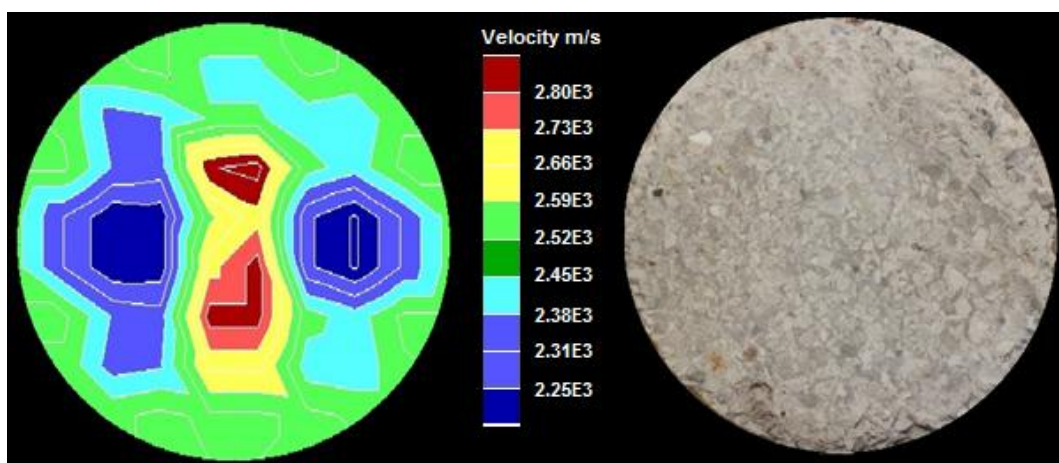


Figura A.9 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

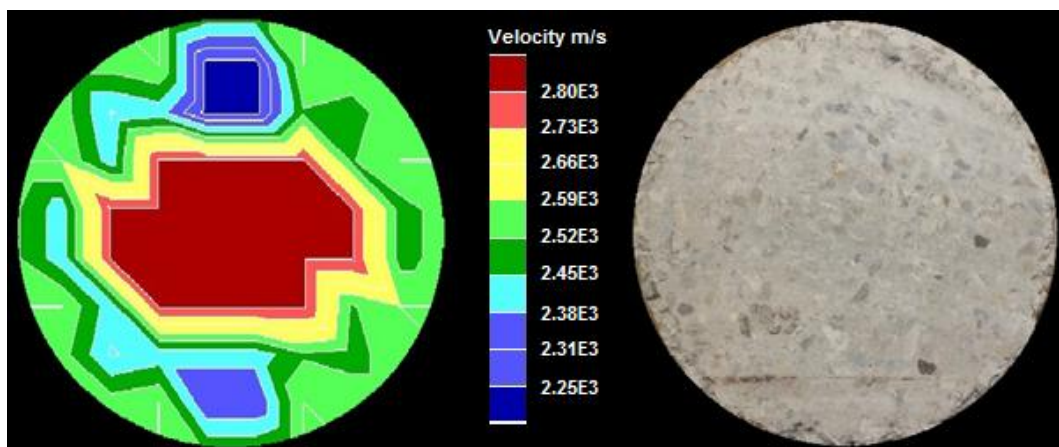


Figura A.10 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra de calcário

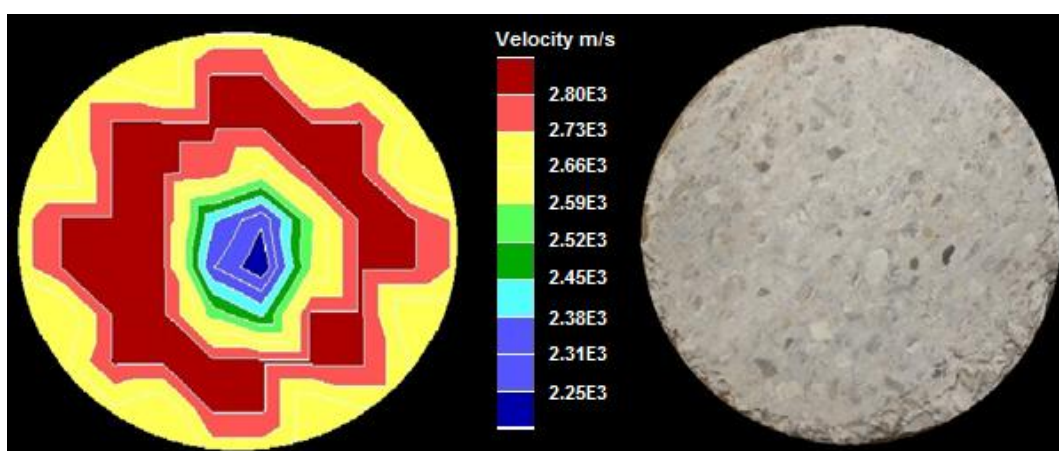


Figura A.11 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra de calcário

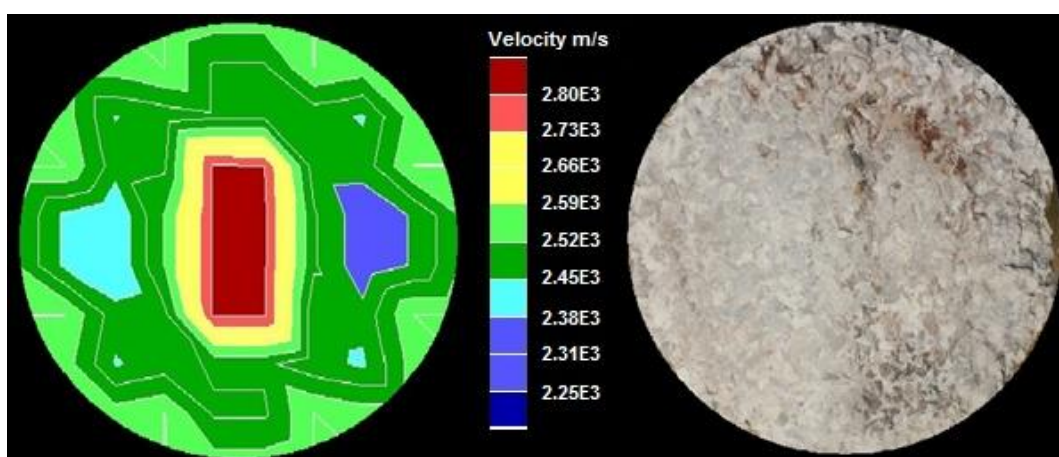


Figura A.12 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra de calcário

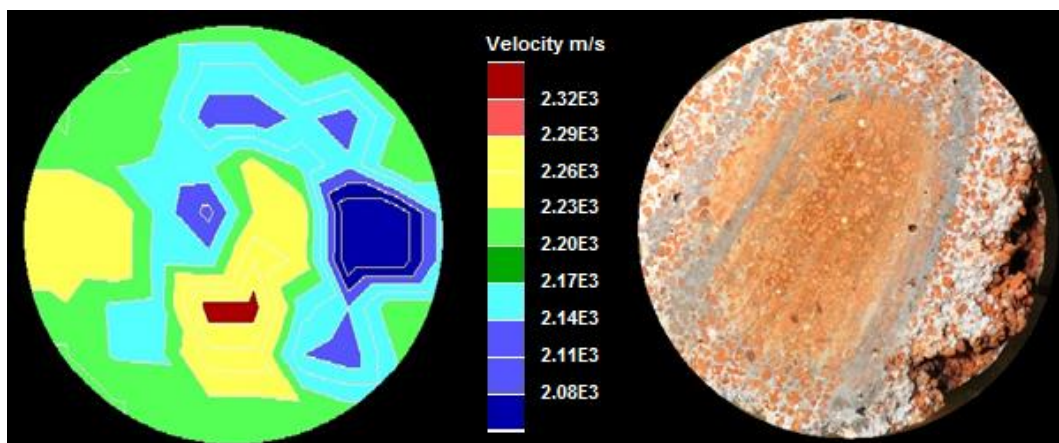


Figura A.13 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

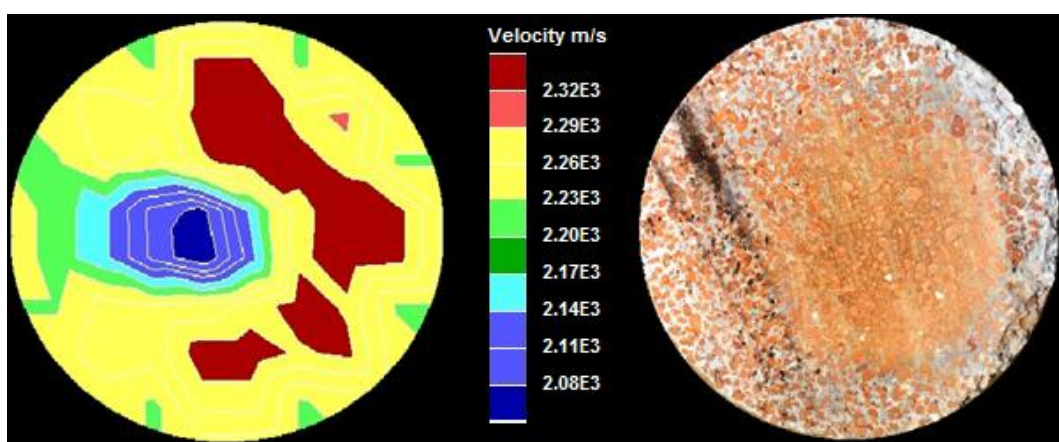


Figura A.14 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

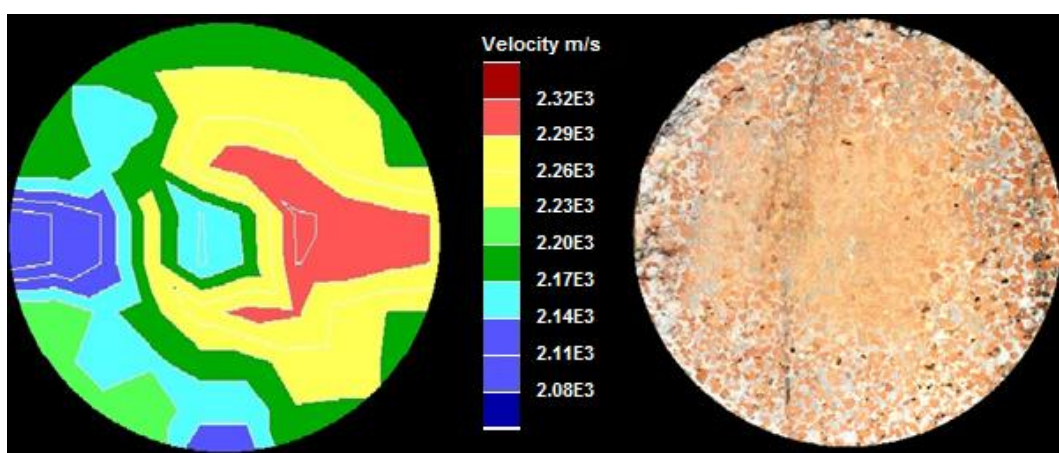


Figura A.15 - Meio poroso D, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica

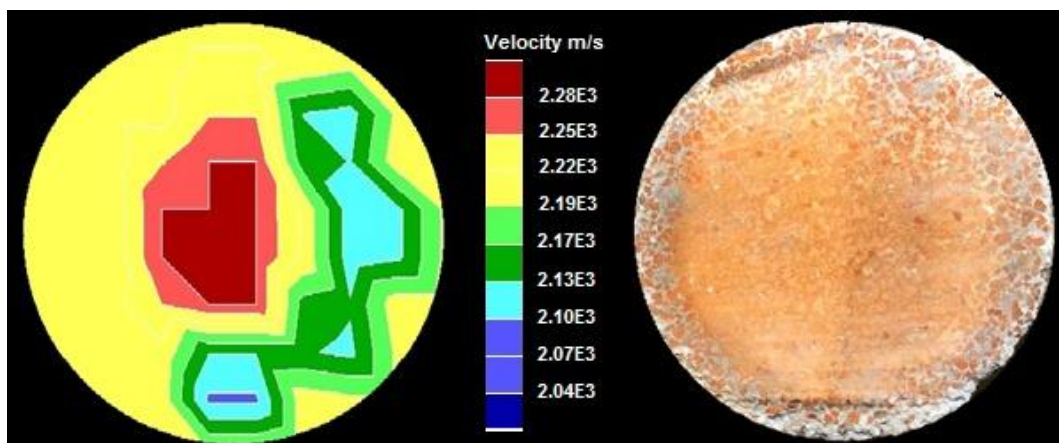


Figura A.16 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

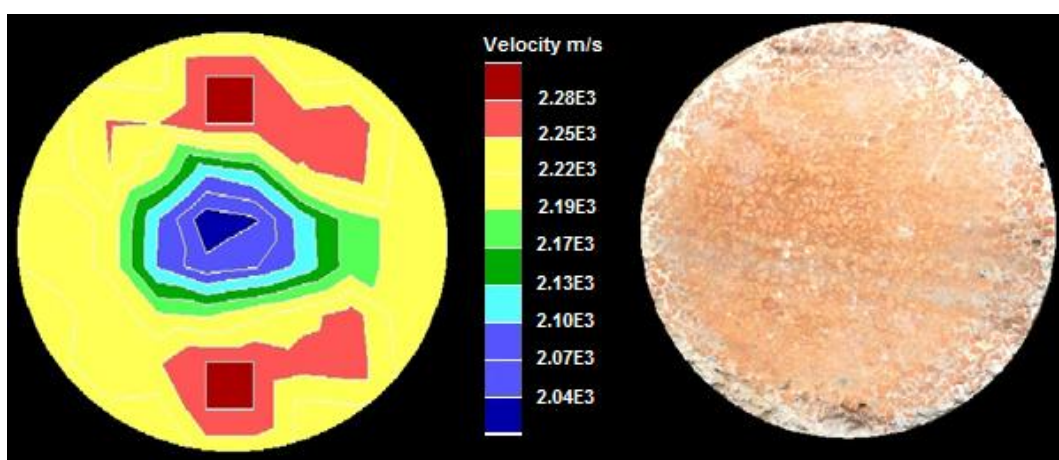


Figura A.17 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

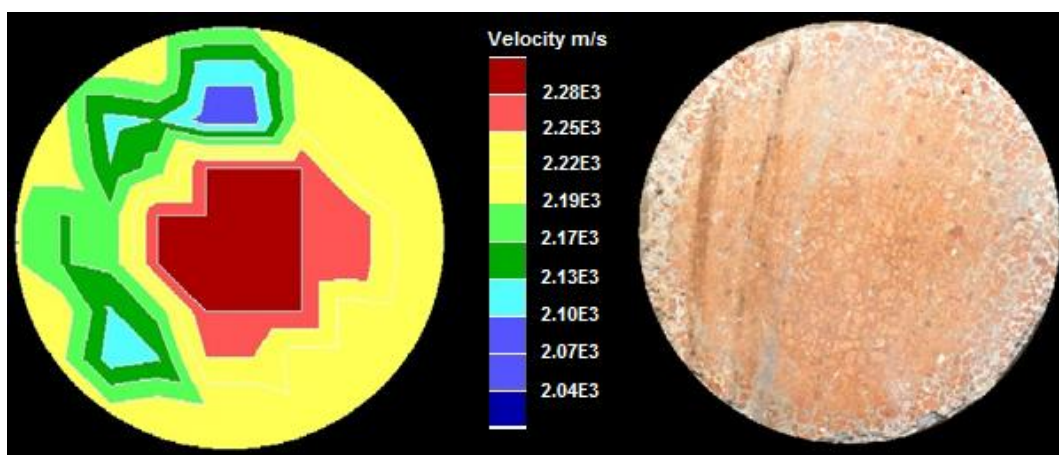


Figura A.18 - Meio poroso D, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

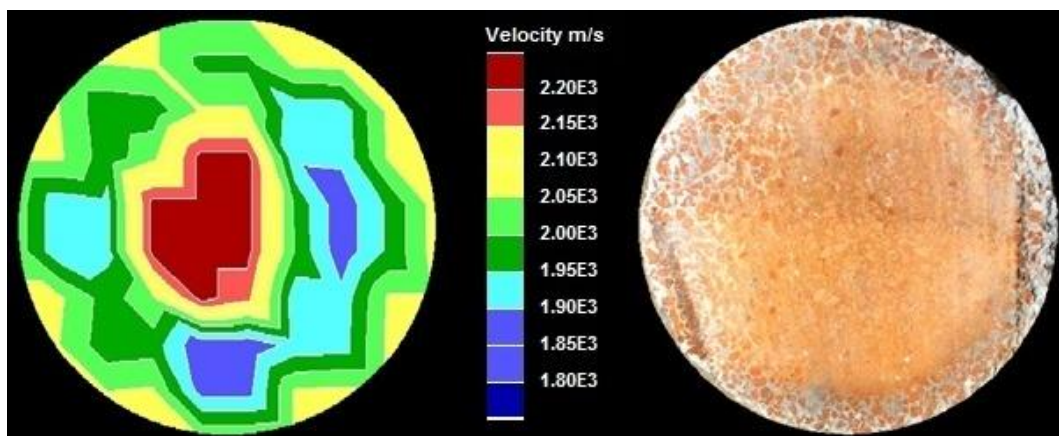


Figura A.19 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

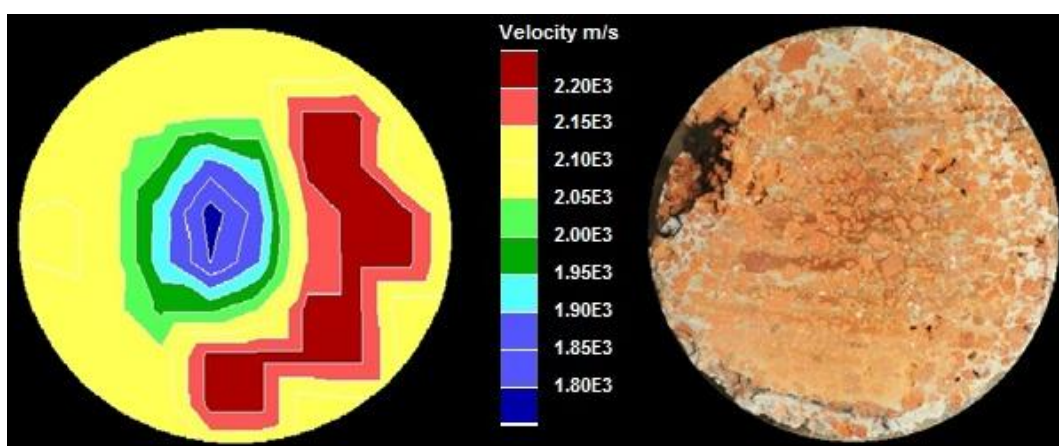


Figura A.20 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

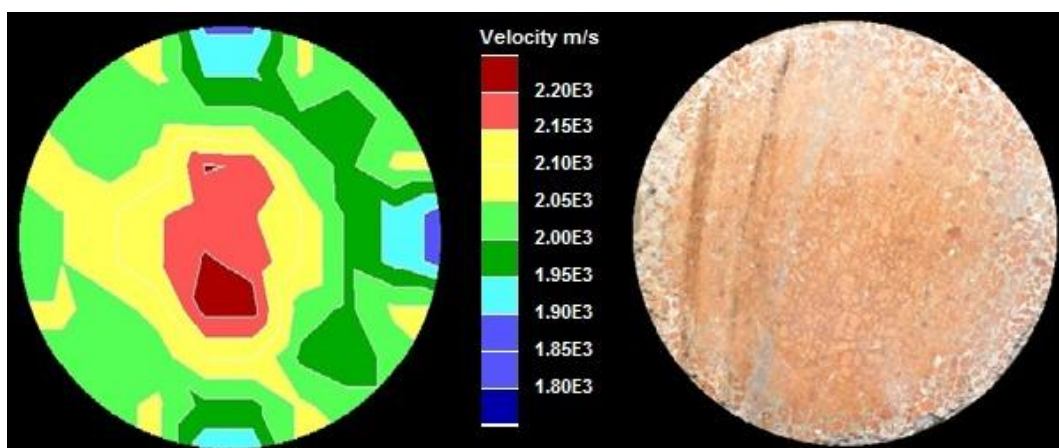


Figura A.21 - Meio poroso E, seco: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica

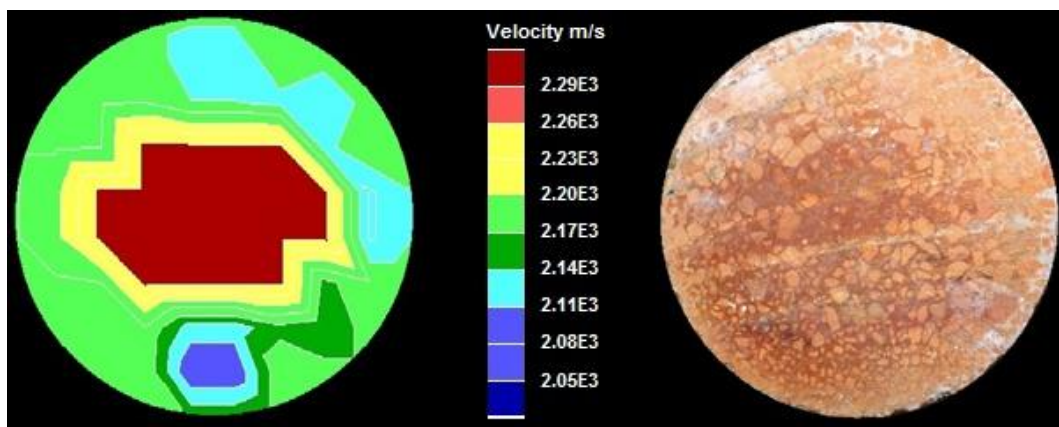


Figura A.22 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia da base da amostra cerâmica

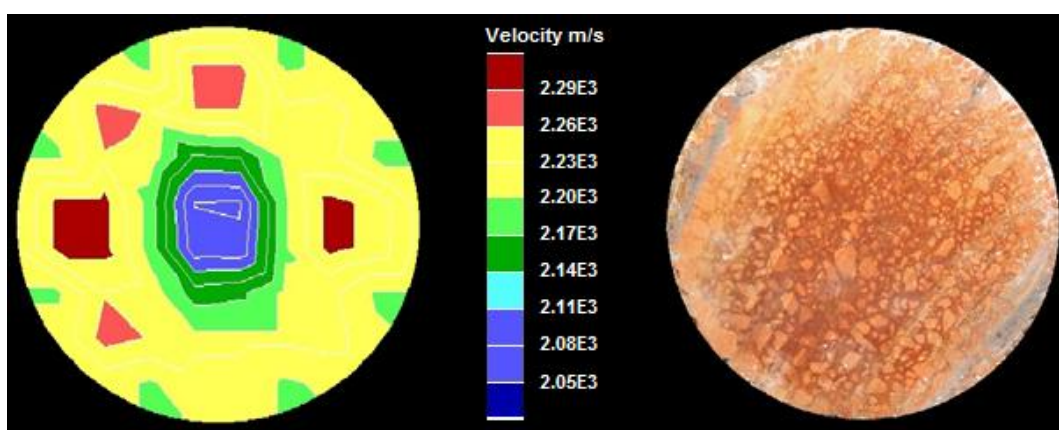


Figura A.23 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do meio da amostra cerâmica

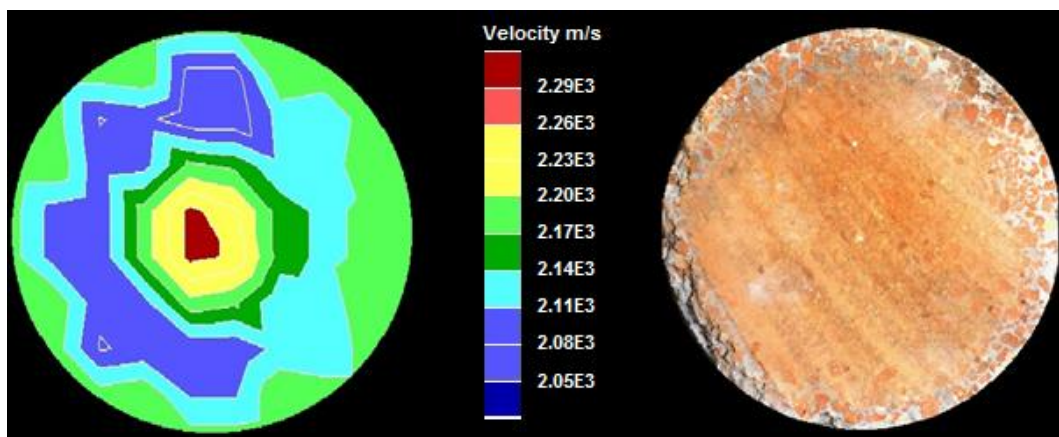


Figura A.24 - Meio poroso E, pré-molhado: tomograma (esq.) e fotografia (dir.) do plano superior da fatia do topo da amostra cerâmica